



UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SANTA CATARINA



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Rodolfo Marue Kirch Sampaio Veiga

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE ENTRADA PARA A PREDIÇÃO DA CARGA
TÉRMICA DE UMA RESIDÊNCIA MULTIFAMILIAR ATRAVÉS DA NOVA
PROPOSTA DO REGULAMENTO BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM**

Florianópolis, SC
Dezembro, 2018

Rodolfo Marue Kirch Sampaio Veiga

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE ENTRADA PARA A PREDIÇÃO DA CARGA
TÉRMICA DE UMA RESIDÊNCIA MULTIFAMILIAR ATRAVÉS DA NOVA
PROPOSTA DO REGULAMENTO BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da
Universidade Federal de Santa Catarina como
requisito para a obtenção do Título de Bacharel
em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Roberto Lamberts, PhD.

Coorientadora: Eng. Civil Ana Paula Melo, Dra.

Florianópolis, SC
Dezembro, 2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Kirch Sampaio Veiga, Rodolfo Marue
Análise dos parâmetros de entrada para a predição da
carga térmica através da nova proposta do regulamento
brasileiro de etiquetagem / Rodolfo Marue Kirch Sampaio
Veiga ; orientador, Roberto Lamberts, coorientadora, Ana
Paula Melo, 2018.
102 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Engenharia Civil. 3. Eficiência
Energética em Edificações. 4. Análise de Sensibilidade
Global. 5. Habitações de Interesse Social. I. Lamberts,
Roberto. II. Melo, Ana Paula. III. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Rodolfo Marue Kirch Sampaio Veiga

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE ENTRADA PARA A PREDIÇÃO DA
CARGA TÉRMICA DE UMA RESIDÊNCIA MULTIFAMILIAR ATRAVÉS DA
NOVA PROPOSTA DO REGULAMENTO BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 30 de novembro de 2018.



Prof. Luciana Rohde, Dra.

Coordenadora do Curso de Engenharia Civil

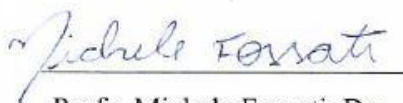
Banca Examinadora:



Prof. Roberto Lamberts, PhD

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Michele Fossati, Dra.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Ricardo Rüther, PhD.

Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a todos os que
contribuíram para a minha formação
como cidadão e profissional.

AGRADECIMENTOS

O trajeto para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso se iniciou muito antes do meu ingresso no curso de Engenharia Civil, por isso, agradeço, sinceramente, a todas as pessoas e instituições envolvidas na minha formação como cidadão e como pesquisador.

Agradeço à minha avó, Elvira Amélia Sampaio Veiga, por apoiar as minhas escolhas, me guiar e me acompanhar em todos os caminhos escolhidos e desvios necessários. Sem a sua determinação e referência, nada seria possível.

Agradeço aos meus pais, Marcus Vinícius Sampaio Veiga e Morgani Kirch Sampaio Veiga, pelo amor e carinho incondicional. Sem o calor dos seus abraços, o impossível seria inalcançável.

Agradeço às minhas maravilhosas irmãs, Alana Rani Kirch Sampaio Veiga e Naiana Rani Kirch Sampaio Veiga, por serem meu maior orgulho e por me servirem de exemplo e inspiração.

Agradeço aos meus amigos, a lembrar de Lucas Hulse Moura, Marcelo Ferreira Filho e Gabriela Assuiti, como representantes de todo o grupo, pelos mais sinceros conselhos e pelas parcerias no luto das derrotas e na comemoração de cada vitória conquistada.

Agradeço a minha equipe de *rugby*, o Desterro Rugby Clube, por me reforçar os valores éticos e morais necessários para se viver, harmonicamente, em sociedade.

Agradeço aos meus orientadores, Roberto Lamberts e Ana Paula Melo, pelo voto de confiança e por me transmitirem seu conhecimento, sem medir esforços.

Agradeço aos meus colegas de pesquisa, a citar Leonardo Mazzaferro, Marcelo Salles Olinger, Rayner Maurício e Silva Machado e Letícia Gabriela Eli, pela paciência e atenção e por me envolverem em um ambiente de trabalho produtivo e agradável.

Agradeço ao meu país, por me proporcionar, gratuitamente, um ensino fundamental, médio e superior de qualidade.

Agradeço ao Laboratório de Eficiência Energética da Universidade Federal de Santa Catarina, por me abrir as portas para o conhecimento.

Enfim, agradeço a todos, que de alguma maneira fizeram parte da minha trajetória de vida pessoal e/ou profissional.

*“Tudo flui... Nenhum homem
pode banhar-se duas vezes no
mesmo rio, porque tanto o
homem, quanto as águas do rio
não serão mais os mesmos.”
(Heráclito de Éfeso)*

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada considerados no método simplificado da nova proposta para a Instrução Normativa Residencial do INMETRO (INI-R). A escolha da edificação do estudo foi realizada utilizando um levantamento estatístico das tipologias mais frequentes no programa do governo federal brasileiro “Minha Casa Minha Vida”. A tipologia em formato H adotada foi analisada nos climas de São Paulo (SP), Cuiabá (MT), Salvador (BA) e Manaus (AM). Inicialmente, aplicou-se o método simplificado, na tipologia base, para verificar o resultado de carga térmica. Alguns dos parâmetros de entrada do metamodelo foram selecionados para posterior análise de sensibilidade, dentre os quais destacam-se: absorvância térmica da cobertura e das paredes externas, transmitância térmica da cobertura e das paredes externas, porcentagem envidraçada das fachadas, fator de ventilação e uso de venezianas. Em seguida, foi desenvolvida uma amostragem quasi-aleatória, através do método de Sobol, com base nos parâmetros escolhidos, através da qual foi aplicada a análise de sensibilidade. Finalmente, foi realizada a análise de sensibilidade global, pela metodologia de Sobol, na amostragem desenvolvida, e estimados os potenciais de economia energética quando alterado, discretamente, determinado parâmetro de entrada. Os resultados obtidos pelo método simplificado indicaram que, em apenas 12,5% das habitações dos pavimentos intermediários e das coberturas apresentaram classe de eficiência energética “C”, enquanto o restante apresentou classe “D”. Nesses pavimentos, o clima de AM apresentou a maior eficiência. Nos pavimentos térreos, 37,5% das habitações apresentaram classe “B”, e o restante apresentou classe “C”. Foi identificado que, para os climas de MT, BA e AM, a carga térmica de resfriamento se provou até 200 vezes maior do que a carga térmica de aquecimento, enquanto que, para o clima de SP, esse valor variou de 7,7 a 76,9 vezes. As condições de exposição do piso e cobertura e das fachadas influenciou na carga térmica de resfriamento. Em todos os climas analisados, o pavimento de cobertura (piso não exposto e cobertura exposta) obteve maior carga térmica, seguido dos pavimentos intermediários (piso e cobertura não expostos) e, finalmente, do pavimento térreo (piso exposto e cobertura não exposta). Os resultados obtidos pela análise de sensibilidade indicaram que, nos pavimentos de cobertura, a absorvância da cobertura foi o parâmetro mais influente para a predição da carga térmica, seguida pelo uso de venezianas, enquanto a absorvância das paredes externas e o fator de ventilação se encontraram entre os menos influentes. Nos pavimentos intermediários, o uso de veneziana apresentou-se como o parâmetro mais influente, e o fator de ventilação como o menos influente. Nos pavimentos térreos, novamente, o uso de veneziana demonstrou a maior influência, enquanto a absorvância das paredes externas demonstrou a menor influência. Destaca-se que, para os climas analisados, as variáveis com maior influência na predição da carga térmica apresentaram os maiores potenciais de economia de energia estimados. Nos pavimentos de cobertura, a alteração da absorvância da cobertura, de 0,8 para 0,2, gerou economias médias de 51,1 (83,6%), 123 (38,8%), 140,4 (42,8%) e 146,6 kWh/m²ano (36,2%), nos climas de SP, MT, BA e AM, respectivamente. A aplicação de veneziana gerou economias médias de 18,8 (72,4%), 52,2 (22,7%), 57,6 (18,6%) e 58,2 kWh/m²ano (23,2%), nos pavimentos intermediários dos climas de SP, MT, BA e AM, respectivamente. A mesma alteração nas venezianas gerou economias médias de 4,9 (79,0%), 35,8 (14,9%), 29,9 (14,4%), 25,4 kWh/m²ano (7,7%), nos pavimentos térreos dos climas de SP, MT, BA e AM, respectivamente.

Palavras-chave: Eficiência Energética em Edificações. Regulamento Brasileiro de Etiquetagem Residencial. Análise de Sensibilidade Global.

ABSTRACT

This paper presents an assessment on the inputs data considered in the INMETRO's Residential Normative Instruction (INI-R). The typology was selected based on a statistical survey of "Minha Casa Minha Vida" federal government program. The typology in H format was analyzed into four climates: São Paulo (SP), Cuiabá (MT), Salvador (BA) and Manaus (AM). Firstly, the Brazilian Regulation was applied into the base case. Some inputs data were selected for a sensitivity analysis, such as ceiling and external walls thermal absorptance, ceiling and external walls thermal transmittance, glazing area, open factor and blinds. Then, a quasi-random sample was developed, through Sobol's methodology, based on the inputs data selected. Finally, global sensitivity analysis was applied on the developed sample, through Sobol's methodology, on developed sample, and the energy economy potentials was assessed by varying discreetly some inputs values. The results indicated that, only 12.5% of intermediary and top floor achieved energy efficiency level "C", while other floors achieved level "D". For the former floors, AM presented the greatest efficiency level. For the ground floors, 37.5% presented level "B" and the remaining presented level "C". It was observed that, for the climates of MT, BA and AM, the cooling thermal load was 200 times higher than the heating thermal load. For the climate of SP, this value ranged from 7.7 to 76.9 times. The expose conditions of floor, ceiling and façades influenced the cooling thermal load. For all climates, the top floor (non exposed floor and exposed ceiling) obtained a higher thermal load, followed by intermediate floors (floor and ceiling not exposed) and, finally, of the ground floor (exposed floor and ceiling not exposed), and façades with exposure to the north, when analyzed on the same floor, obtained higher thermal loads than the façades exposed to the south. The results from sensitivity analysis highlighted that, the ceiling thermal absorptance was the most influential input for thermal load prediction on top floors, followed by blinds, while the external walls thermal absorptance and windows open factor were the less influential. For intermediary floors, the blinds were the most influential input, and the open factor the less influential input. For ground floors, the blinds also presented the same behavior as for intermediary floors, while the external walls thermal absorptance was the less influential. The most influential inputs data for thermal load prediction presented the greatest estimated energy saving potentials. For top floors, the ceiling absorptance from 0.8 to 0.2 presented and energy saving of (83.6%), 123 (38.8%), 140.4 (42.8%) and 146,6 kWh/m² (36.2%), in the climates of SP, MT, BA and AM, respectively. In the intermediate floors, the blinds showed an energy saving of 18.8 (72.4%), 52.2 (22.7%), 57.6 (18.6%) and 58.2 kWh/m² (23, 2%), in the climates of SP, MT, BA and AM, respectively. The same change in venetian blinds generated an energy savings of 4.9 (79.0%), 35.8 (14.9%), 29.9 (14.4%), 25.4 kWh/m² (7.7%), in the climates of SP, MT, BA and AM, respectively.

Keywords: Building Energy Efficiency. Brazilian Residential Labeling Regulation. Global Sensitivity Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Caso base: tipologia H típica do Nível de renda 1, representada no Revit. Fonte: Triana (2016).	45
Figura 2 – Pavimento tipo e habitação tipo da tipologia H de nível de renda 1. Fonte: adaptado do projeto de AutoCAD utilizado em Triana (2016).	47
Figura 3 – Zonas térmicas na habitação caso base. Fonte: adaptado do projeto de <i>AutoCAD</i> utilizado em Triana (2016).	49
Figura 4 – Rosa dos ventos com a identificação das UH.	50

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Histogramas de distribuição dos parâmetros de entrada na amostragem.....	65
Gráfico 2 – Comparação das cargas térmicas de resfriamento dos casos extrapolado e ajustado.	68
Gráfico 3 – Relação carga térmica de aquecimento sobre carga térmica de resfriamento da condição real, por UH.....	70
Gráfico 4 – Carga térmica de resfriamento da condição real por UH.....	72
Gráfico 5 – Redução da carga térmica de resfriamento da condição real por UH.	74
Gráfico 6 – Acréscimo ou decréscimo na classe de eficiência energética por UH.	77
Gráfico 7 – Análise de sensibilidade total de Sobol dos pavimentos de cobertura.	79
Gráfico 8 – Comportamento global da absorvência da cobertura nos pavimentos de cobertura.	79
Gráfico 9 – Comportamento global do uso de venezianas nos pavimentos de cobertura.	81
Gráfico 10 – Comportamento global da absorvência das paredes externas nos pavimentos de cobertura.	83
Gráfico 11 – Análise de sensibilidade total de Sobol dos pavimentos intermediários.	84
Gráfico 12 – Comportamento global do uso de venezianas nos pavimentos intermediários.	85
Gráfico 13 – Comportamento global fator de ventilação nos pavimentos intermediários.	87
Gráfico 14 – Análise de sensibilidade total de Sobol dos pavimentos térreos.	88
Gráfico 15 – Comportamento global do uso de venezianas nos pavimentos térreos.	89
Gráfico 16 – Comportamento global da absorvência das paredes externas nos pavimentos térreos.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Extraída da Tabela de consumo e eficiência energética de aquecedores de água a gás instantâneos. Fonte: INMETRO (2017).	48
Tabela 2 – Resumo das características da condição real e de referência para o caso base.	48
Tabela 3 – Enumeração das UH por pavimento e por fachada.	50
Tabela 4 – Limites de aplicação do método simplificado da INI-R.	51
Tabela 5 – Valores das variáveis climáticas independentes para as quatro cidades em análise, necessárias para o funcionamento do metamodelo.	53
Tabela 6 – Escala de classificação da envoltória da UH, extraída da INI-R. Fonte: INMETRO (2018).	56
Tabela 7 – Temperatura de uso ($\theta_{A,uso}$ [°C]) e temperatura de água fria ($\theta_{A,0}$ [°C]) para as quatro cidades analisadas.	58
Tabela 8 – Escala de classificação do sistema de aquecimento de água da UH. Fonte: INMETRO (INMETRO, 2018).	59
Tabela 9 – Seção da Tabela F.1 da INI-R, que refere-se ao fator de emissão de dióxido de carbono por queima de combustível.	61
Tabela 10 – Tabela F.2 da INI-R, que se refere ao fator de emissão de dióxido de carbono por geração de elétrica.	61
Tabela 11 – Intervalo de variação dos parâmetros de entrada quando aplicada a análise de sensibilidade de Sobol sobre a carga térmica de resfriamento.	63
Tabela 12 – Consumo de energia primária do sistema de envoltória para condição real e de referência.	71
Tabela 13 – Consumo de energia primária com de aquecimento de água.	75
Tabela 14 – Emissão de gás carbônico, consumo de energia primária e redução do consumo de energia primária para as condições real e de referência, por UH.	76
Tabela 15 – Estatística descritiva para a absorvância da cobertura nos pavimentos de cobertura.	80
Tabela 16 – Estatística descritiva para o uso de veneziana nos pavimentos de cobertura.	82
Tabela 17 – Estatística descritiva para a absorvância das paredes externas nos pavimentos de cobertura.	83

Tabela 18 – Estatística descritiva para o uso de veneziana nos pavimentos intermediários.	86
Tabela 19 – Estatística descritiva para o fator de ventilação nos pavimentos intermediários.	88
Tabela 20 – Estatística descritiva para o uso de veneziana nos pavimentos térreos.	90
Tabela 21 – Estatística descritiva para a absorção das paredes externas nos pavimentos térreos.	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

APP – Ambiente de Permanência Prolongada

ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*

CB3E – Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações

CgT – Carga Térmica

COP – Coeficiente de Performance

EMS – *Energy Management System*

ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

GCL – Grupo Climático

HIS – Habitação de Interesse Social

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LEED – *Leadership in Energy and Environmental Design*

MCMV – Minha Casa, Minha Vida

MEE – Medida de Eficiência Energética

NBR – Norma Brasileira

PHOC_T – Percentual de Horas em Conforto Total

PNE – Plano Nacional de Energia

RNA – Redes Neurais Artificiais

RTQ-R – Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

RTQ-C – Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviço e Públicas

UH – Unidade Habitacional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. JUSTIFICATIVA	18
1.2. OBJETIVOS	21
1.2.1. Objetivo geral.....	21
1.2.2. Objetivos específicos.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1. DEMANDA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES.....	22
2.2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES	25
2.2.1. Normas de desempenho térmico	28
2.2.2. Regulamentação para etiquetagem de eficiência energética	31
2.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	38
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
3. MÉTODO	43
3.1. DADOS DE ENTRADA	44
3.1.1. Condição real	46
3.1.2. Condição de referência.....	48
3.1.3. Zonas térmicas	49
3.1.4. Identificação das unidades habitacionais	50
3.2. MÉTODO SIMPLIFICADO	51
3.2.1. Envoltória	52
3.2.2. Aquecimento de água	57
3.2.3. Classificação geral da unidade habitacional	59
3.4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE GLOBAL	61
3.4.1. Análise de sensibilidade de Sobol	61
3.4.2. Estimativa das economias de energia.....	65
4. RESULTADOS	67

4.1. MÉTODO SIMPLIFICADO	67
4.1.1. Caso extrapolado x ajustado.....	67
4.1.2. Caso base	69
4.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE SOBOL	78
4.2.2. Análise dos pavimentos intermediários	84
4.2.3. Análise do pavimento térreo	88
5. CONCLUSÃO.....	93
5.1. LIMITAÇÕES	95
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
REFERÊNCIAS	97

1. INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA

A demanda por recursos energéticos tende a se agravar à medida em que a população e o poder aquisitivo aumentam. Em 2015, a população mundial atingia cerca de 7,4 bilhões de habitantes e projeções estimam um crescimento populacional de 20% até 2050 (UNPD, 2017). O Plano Nacional de Energia 2050 (2016) projeta para a população brasileira um aumento de, aproximadamente, 30 milhões de habitantes e que a renda per capita do cidadão brasileiro se elevará aos padrões europeus, de modo que a demanda por energia aumentará mais de duas vezes.

Segundo a Fundação João Pinheiro (2015), existe hoje, no Brasil, um déficit habitacional de 6,4 milhões de domicílios, sendo 87,7% em áreas urbanas. Considerando que se estima uma taxa de urbanização maior que 88% até 2050 (EPE, 2016), que 80,3% dos imóveis vagos no Brasil encontram-se em áreas urbanas (PNAD, 2015) e que a urbanização pode ser uma tendência sustentável (OJIMA, 2016), é esperado que as residências vagas sejam ocupadas, nos próximos anos, tal que o déficit habitacional diminuirá, consideravelmente, e a demanda residencial por energia aumentará.

Uma das soluções encontradas pelo governo brasileiro para o déficit habitacional é o Plano Nacional de Habitação, que se utiliza de programas como o “Minha Casa Minha Vida” (MCMV), a fim de oferecer habitações de interesse social a baixos custos para famílias de baixa renda (KRAUSE, BALBIM, LIMA, 2013). Até hoje o MCMV já construiu milhões de edificações e o Plano Plurianual 2016-2019 projeta investimentos para a execução de mais três milhões de moradias (MPDG, 2018).

Atualmente, no cenário global, entre 20 e 40% do consumo de energia primária e 1/3 da emissão de gases de efeito estufa (GEE) é responsabilidade do setor de edificações (AMASYALI, EL-GOHARY, 2018; WEI et al., 2018; MONZONI, VENDRAMINI, 2017; WANG, SRINIVASAN, 2017), sendo que as edificações residenciais são responsáveis por 3/4 do consumo de energia primária das edificações (NEJAT et al., 2015). Já no Brasil, em 2013, o consumo de energia elétrica de edificações residenciais correspondia a 24,3% do consumo total de energia elétrica do país e projeta-se que até 2020 essa participação corresponderá a 25,2% (EPE, 2016).

O aumento da produção de energia é uma das vertentes vislumbradas para atender ao aumento da demanda nos próximos anos, entretanto, a matriz energética esgotável emite quantidades excessivas de GEE, nocivos ao meio-ambiente. Essa matriz está se tornando escassa e o preço da energia aumenta (HADJIPASCHALIS, POULLIKKAS, EFTHIMIOU, 2009). Diversos países têm realizado esforços para reduzir a emissão de GEE, como a Califórnia (WILLIAMS et al., 2012) e a Europa (ECF, 2010), que estabeleceram metas de redução da emissão desses gases em 80%, até 2050. Para tanto, é necessário que se substitua as fontes esgotáveis por fontes renováveis e que se invista em eficiência energética (CEC, 2017).

Maior parte da fonte energética brasileira provém da fonte renovável de recursos hídricos, porém, esses recursos estão perdendo força gradualmente (BRONZATTI, IAROSINSKI, 2008), de modo que o PNE (EPE, 2016) projeta que a fonte hidráulica, a partir de 2018, não será capaz de atender à demanda de energia elétrica nacional e o país precisará procurar por novas fontes renováveis de abastecimento energético.

A segunda alternativa para que a população mundial tenha acesso à energia é a redução do consumo energético. Visto que as edificações são responsáveis por parte considerável da demanda de energia, investir em eficiência energética das edificações é uma alternativa sustentável para diminuir o consumo e garantir que a população tenha acesso à energia (PEREIRA, 2009).

Discussões sobre sustentabilidade se desenvolveram a nível internacional através de grandes encontros como a Primeira Conferência Internacional sobre a Construção, em 1994, onde foram abordados assuntos como a conservação e gestão sustentável de recursos para a construção civil (GANHÃO, 2011; ONU, 1995). A preocupação ambiental levou os Estados Unidos a desenvolver sua primeira norma referente à eficiência energética, a ASHRAE (ASHARE, 2016).

No Brasil os incentivos à eficiência energética iniciaram com a promulgação da Lei nº 9.991 (BRASIL, 2000), entretanto, apenas com a crise energética do setor elétrico de 2001 é que o país entendeu a dimensão da problemática e promulgou a Lei nº 10.295 (BRASIL, 2001), conhecida como “Lei da Eficiência Energética”, que estabelece níveis mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos elétricos e de edificações. Nos anos que seguiram foram elaboradas as normas de Desempenho Térmico de Edificações, a NBR 15220 (ABNT, 2005), e de Desempenho de Habitações, a NBR 15575 (ABNT, 2013), que servem como base para o desenvolvimento do Regulamento Técnico da

Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, o RTQ-R (INMETRO, 2012).

A NBR 15220 delimitou zonas bioclimáticas que agrupam regiões com padrões climáticos semelhantes e sugerem estratégias de eficiência energética em edificações para cada zona bioclimática (ABNT, 2005). Enquanto a NBR 15575 utiliza o zoneamento bioclimático, sugerido pela NBR 15220, e analisa o desempenho térmico, acústico, lumínico, a segurança ao fogo, entre outros (ABNT, 2013).

O RTQ-R utiliza a zona bioclimática, elaborada e divulgada na NBR 15220, e os limites de valores das propriedades térmicas dos componentes construtivos, extraídos da NBR 15575, como parâmetros de entrada de um metamodelo que calcula equivalentes numéricos, por regressões lineares múltiplas, a partir dos quais estima-se o desempenho térmico da edificação (INMETRO, 2012).

Uma nova proposta para o RTQ-R foi sugerida, a Instrução Normativa para edificações Residenciais, a INI-R (INMETRO, 2018), que utiliza um novo metamodelo, a partir de redes neurais artificiais, para estimar a carga térmica dos ambientes de permanência prolongada (MAZZAFERRO et al., 2018). Como o consumo energético da edificação é calculado a partir da carga térmica dos ambientes e o condicionamento artificial de ar caracteriza cerca de 60% da demanda total de energia das edificações (HUANG et al. 2014), entender o comportamento dos parâmetros de entrada para estimar a carga térmica é uma maneira de auxiliar na escolha dos componentes construtivos para desenvolver medidas de eficiência energética (MEE), através das quais se desenvolvem edificações mais eficientes.

Foi reconhecido que a população, a urbanização e o poder aquisitivo tendem a crescer, que existe um déficit habitacional a ser suprido nos próximos anos por habitações de interesse social vagas, como as desenvolvidas pelo MCMV, e que o setor residencial representa parte significativa do consumo energético global. A INI-R se apresenta como uma ferramenta que estima o consumo energético através de modelos preditivos, que utilizam as características termo-físicas dos componentes construtivos como dados de entrada. Portanto, a análise do comportamento dos parâmetros de entrada para estimar a carga térmica de edificações multifamiliares de baixa renda deve auxiliar na escolha de MEE de baixa complexidade e custo, capazes de gerar economias consideráveis de energia (WEI et al., 2018) e garantir o suprimento de energia das próximas gerações.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento das propriedades termo-físicas de habitações de interesse social, utilizadas como parâmetro de entrada para a predição da carga térmica através do metamodelo do método simplificado da nova proposta para o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, a Instrução Normativa para edificações Residenciais do INMETRO (INI-R).

1.2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Aplicar e testar o método simplificado da INI-R para a tipologia base nas regiões geográficas onde encontram-se registros da tipologia;
- Estimar os potenciais de economia energética provenientes da variação discreta dos parâmetros mais influentes para a predição da carga térmica;
- Elaborar um material que contribua para o desenvolvimento da eficiência energética em habitações de interesse social.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. DEMANDA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

Um dos maiores desafios encontrados pela humanidade atualmente está diretamente relacionado à energia. Em 2001, o Brasil enfrentou uma grande crise energética de custosa superação. Como fator agravante, o aumento da demanda energética mergulhou o país em uma nova, e ainda mais grave, crise energética no ano de 2015. Dificuldades de abastecimento levaram à reativação de usinas termoeletricas, que elevaram o preço da energia significativamente, refletindo diretamente no consumidor final e distanciando investidores. Além disso, devido à fonte hidráulica ser responsável pela oferta de 62% da energia elétrica brasileira, em 2015 (EPE, 2017), a falta de chuvas de 2014 foi um dos fatores intensificadores para o que foi a maior crise de energia elétrica do país (THOMAZ, 2017).

A despeito dos problemas de oferta, a demanda de energia cresce com o aumento da população e do poder aquisitivo, situação que se estende por todo o planeta. O Plano Nacional de Energia 2050 (PNE, 2016), projeção fomentada pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e realizada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), estima que até 2050 o Brasil contará com 30 milhões de novos habitantes e que a renda per capita brasileira se elevará aos padrões europeus, fazendo com que, nesse período, a demanda energética cresça pouco mais de duas vezes (aproximadamente 2,2% ao ano). O mesmo estudo sugere que, até 2050, a demanda por energia elétrica aumentará em 6,7% (de 16,9% em 2013, para 23,6% em 2050) em relação ao consumo total de energia primária.

O aumento da demanda energética somado a produção de energia a partir de fontes cada vez mais escassas aumentou o preço da energia, como a economia é dependente do suprimento energético, a situação se tornou crítica. (HADJIPASCHALIS, POULLIKKAS, EFTHIMIOU, 2009).

Apesar de ser uma dificuldade brasileira, nitidamente exposta em 2001 e 2015 com as crises já relatadas, Sousa (2012) indica que essa é uma problemática internacional, já que se repete também em Portugal, onde a energia elétrica representa 25% da demanda de energia total e, para atender a essa exigência, em 2010 o país precisou importar 77% do combustível fóssil utilizado na produção energética. Para tanto, é necessário que se

busque fontes alternativas que tornem a oferta de energia interna suficiente para sustentar a demanda.

É possível separar a ampla gama de soluções propostas para a crise energética global em duas vertentes: aumentar a produção de energia e/ou diminuir a demanda.

Para aumentar a produção de energia, de acordo com a primeira vertente de soluções, é necessário incrementar a produção de energia através de fontes sustentáveis, pois o aumento extensivo da exploração de fontes finitas e emissoras de gases de efeito estufa (GEE), que já acontece em larga escala, traz consequências irreparáveis ao meio ambiente. Bronzatti e Iarozinski Neto (2008) recordam que a energia hidráulica é a maior fonte de energia limpa gerada no Brasil e, mesmo tendo grande importância no cenário energético nacional, está perdendo força a cada ano. Projeções realizadas pelo PNE (EPE, 2016) para os próximos anos identificam que, a partir de 2018, a capacidade de produção de energia elétrica através da fonte hidráulica não será mais capaz de satisfazer a demanda total nacional como nos anos anteriores e o país terá que procurar por novas alternativas para vencer o cenário energético global.

Apesar de inesgotáveis, a produção de energia livre de carbono trabalha de forma irregular e depende rigorosamente de fatores climáticos. Diferente das fontes tradicionais, onde a produção aumenta conforme a demanda, as fontes sustentáveis apresentam picos de oferta ao longo do dia, do mês e até mesmo do ano, sendo que, uma matriz que depende exclusivamente de fontes renováveis para produção de energia torna-se refém de oscilações naturais (HADJIPASCHALIS, POULLIKKAS, EFTHIMIOU, 2009).

Em 2015 o Brasil investiu 51 bilhões de reais em fontes renováveis, os maiores investimentos foram em energia solar e eólica, enquanto o investimento global foi de 328,9 bilhões de dólares, indicando um crescimento de 156% em relação a 2006 (MONZONI, VENDRAMINI, 2017). Apesar das evoluções nos investimentos e nas linhas de pesquisa que buscam a viabilização e rentabilidade de fontes de energia limpa, as soluções para a produção de energia livre de carbono não são fáceis e a demanda aumenta descontroladamente, assim sendo, a utilização de fontes esgotáveis será inevitável. Adentra-se, então, em um novo desafio que serve de *link* entre as duas soluções propostas: produção de energia sem emissão de GEE.

Williams et al. (2012), discorre sobre a meta californiana de reduzir a emissão de GEE na atmosfera em 80% até 2050, seguindo o crescimento natural da população e do PIB, a projeção para 2050 seria a emissão de 875 Mt CO_{2e} (dióxido de carbono

equivalente), o foco, então, é reduzir esse valor para 85 Mt CO_{2e}. Esse objetivo se baseia em estudos do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), que afirmam ser essa regressão necessária para estabilizar os níveis de gases poluentes na atmosfera, diminuindo seus efeitos nas mudanças climáticas. Para o estado da Califórnia, as maiores reduções de GEE são provenientes de medidas de eficiência energética (MEE) aplicadas nas edificações. Dentre as ações necessárias para atingir as metas estipuladas, o governo californiano cita o aumento da participação de fontes renováveis de 1/3 para 1/2 e aumentar em duas vezes a eficiência energética de edificações já existentes (CEC, 2017).

A responsabilidade das edificações na demanda energética e na emissão de GEE na atmosfera é inegável. Na Europa, em 2012, os edifícios corresponderam a 36% das emissões de GEE, relativo ao consumo de 40% da energia primária (ZHAO, MAGOULÈS, 2012). É natural que países com o mesmo nível de desenvolvimento enfrentem problemas semelhantes. O relatório “*Roadmap 2050*” (ECF, 2010), realizado pela *European Climate Foundation*, comprova essa conclusão, já que para reduzir a emissão de GEE em 80%, medidas semelhantes em eficiência energética nas edificações são necessárias, como o aumento do uso de aquecedores solares e de bombas de calor para a climatização. Dentre as medidas de eficiência energética nas edificações, frisa-se a importância da geração de energia renovável *in-loco*, podendo levar os edifícios, em um futuro próximo, ao consumo zero (WILLIAMS et al., 2012).

O setor de edificações é responsável pelo consumo de 1/3 da energia total produzida no planeta e pela emissão de 30% do CO₂ na atmosfera. Frente a essa conjuntura, a Unidade de Inteligência Econômica (*The Economist Intelligence Unit*), da GBPN (*Global Buildings Performance Newtwork*), propôs uma estratégia conhecida como o “*Deep Path*”, que visa reduzir as emissões de GEE e diminuir em 80% a demanda energética das construções até 2020. Uma pesquisa realizada pela unidade com 423 construções residenciais e executivas reais da Europa, Estados Unidos, China e Índia evidenciou, negativamente, que os gestores de edificações estão mal informados a respeito da realidade energética mundial. Em contrapartida, os entrevistados enxergam a importância da eficiência energética e de suas regulamentações para um mercado mais eficaz e competitivo. Uma prova dessa consciência é que 50% dos entrevistados estão investindo em isolamento térmico nas edificações, em sistemas de condicionamento de ar e de iluminação mais eficientes. Mesmo que o propósito das empresas gestoras de edificações seja torná-las mais competitivas no mercado, a pesquisa confirma que maior

parte dos entrevistados estão dispostos a contribuir para o “*Deep Path*”, consequentemente, essa nova política empresarial, que preza pela eficiência energética, conduzirá o mundo para uma situação energética mais favorável, onde a demanda possa ser suprida sem dificuldades e de maneira inofensiva ao meio ambiente, sustentável (GBPN, 2012).

Thomaz (2017) descreve um crescimento da participação da classe residencial na demanda total de energia elétrica no Brasil de 3,7% ao ano, de 1995 até 2015, chegando à 28% em 2015. O PNE 2050 (EPE, 2016) informa que, em 2014, a eletricidade representava 46,8% do consumo energético residencial e o programa estima que de 2014 até 2050 o consumo de energia elétrica por domicílio quase dobrará, representando, em 2050, 70,9% do consumo energético das residências.

Levando-se em conta as discussões a respeito da economia de energia ao redor do mundo, o prevailecimento do uso de energia elétrica nas residências e a representatividade desse setor no contexto internacional, fica claro que investir no desempenho energético das edificações é uma ótima oportunidade para se economizar energia (PEREIRA, 2009).

2.2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

Com a revolução industrial, a globalização e o advento de tecnologias até então desconhecidas, criou-se a possibilidade de padronizar um estilo construtivo mundial, onde sistemas artificiais de iluminação e climatização colocam o arquiteto em uma situação confortável, já que não precisa se adaptar às condições ambientais locais. O estilo, conhecido como “*american way of life*”, tornou-se uma tendência nas construções, onde consome-se mais energia e recursos em prol de se levar uma “vida melhor” (JANDA, 2011). Essa maneira insustentável de viver levou o Homem a grandes dificuldades econômicas, ambientais e sociais e, a partir de então, a enxergar a situação de outro ângulo, sendo que, atualmente, economizar energia, ou ser energeticamente eficiente, é um tópico considerado pela maioria dos gestores de edificações, de acordo com pesquisa realizada pela GBPN (2012).

Nas últimas décadas a prática tradicional do setor da construção civil, onde se constrói e abandona-se a edificação na fase de operação, está sendo substituída por

estratégias mais eficazes, que levam em conta o desempenho energético dos edifícios ao longo de toda sua vida útil (BAKAR et al., 2015).

Os Estados Unidos foi o país pioneiro na busca por eficiência energética, desenvolvendo a ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*), em 1894. Em 1975 a associação criou sua primeira norma referente ao tema. Com o desenvolvimento acelerado de novas tecnologias, a cada três anos é publicada uma versão atualizada do documento. A versão atual é a ASHRAE 90.1, que tem o propósito de estabelecer requisitos mínimos de eficiência energética em edificações de médio e grande porte, que usam energia elétrica ou de combustíveis fósseis, nas fases de projeto, construção, operação e manutenção, levando em consideração, ainda, o uso de geração de energia renovável *in-loco* (ASHRAE, 2016). A norma americana serve como referência para diversas regulamentações internacionais, a citar Canadá, Índia e Japão, e é utilizada como base para fundamentar cercos conceituais, como acontece na regulamentação brasileira de etiquetagem em vigência (FOSSATI et al., 2016).

Desde a década de 80 já se discute, abertamente, sobre possíveis soluções às consequências das ações humanas no meio ambiente. Nessa época surge o conceito sustentabilidade. Um dos grandes marcos a respeito do assunto foi a elaboração da Agenda 21, apresentada na Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente e o Desenvolvimento, em 1992, no Rio de Janeiro, onde os países desenvolveram estratégias de longo prazo para mitigar seus impactos ambientais (CMADS, 2013). Entre os tópicos fundamentais abordados no documento, é válido citar a conservação e gestão sustentável dos recursos para o desenvolvimento e os seus meios de implementação (ONU, 1995). Em 1994 aconteceu a Primeira Conferência Internacional sobre a Construção e, posteriormente, aplicou-se os fundamentos da Agenda 21 nas edificações (GANHÃO, 2011).

Seguindo essa inclinação aos cuidados com o meio-ambiente, tratados internacionais foram propostos, com o objetivo de limitar os níveis de poluição em diversos âmbitos, inclusive as emissões de gases poluentes na atmosfera. O Protocolo de Quioto (1997), é um exemplo clássico de acordo assinado por diversos países desenvolvidos, dentre eles toda a União Europeia, que já se comprometeram a diminuir a emissão de gás carbônico na atmosfera. Porém, algumas das grandes potências internacionais emissoras de poluentes, como Estados Unidos e Rússia, não pactuam desse

mesmo comprometimento. Mesmo com enorme participação da fonte hidrelétrica na geração de energia e com baixo consumo energético na climatização de ambientes, o Brasil também ratificou, e aprovou internamente pelo Decreto nº 144/2002 (BRASIL, 2002), o referido tratado e se comprometeu a reduzir a emissão de gases nocivos ao meio ambiente (TAVARES, LAMBERTS, 2005).

Após os países desenvolvidos indicarem a direção, os países em desenvolvimento a seguiram. Assim, em julho do ano 2000, no Brasil, foi promulgada a Lei nº 9.991/2000 (BRASIL, 2000), que obriga concessionárias e permissionárias de distribuição de energia elétrica a investir em pesquisa e desenvolvimento do setor elétrico através de programas de eficiência energética. Porém, apenas com o apagão energético de 2001 o Brasil se atentou ao tema e ampliou seus investimentos em eficiência energética. Uma das grandes iniciativas brasileiras foi a promulgação da Lei nº 10.295 (BRASIL, 2001), conhecida como a “Lei da Eficiência Energética”, que estabelece níveis máximos de consumo energético, ou níveis mínimos de eficiência energética, de máquinas, aparelhos e edificações consumidores de energia elétrica.

Com todos os incentivos através das leis nacionais referidas e das normas instituídas nos países desenvolvidos, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) desenvolveu, em 2005, a Norma de Desempenho Térmico de Edificações (NBR 15220). A norma explicita os requisitos mínimos para desempenho térmico de edifícios ainda em projeto, onde se apura o cumprimento de diretrizes construtivas ou realiza-se simulação computacional, ou já construídos, onde analisa-se variáveis que representam o desempenho da edificação (ABNT, 2005). Em 2013 a ABNT publicou a Norma de Desempenho de Habitações (NBR 15575). Diferente do que fora proposto até então, em vez de especificar como os produtos devem ser produzidos, essa norma avalia-os a partir dos resultados que oferecem ao consumidor, em segurança, conforto e resistência. A norma define os critérios e requisitos mínimos de desempenho energético de edificações habitacionais, sendo que é dividida em seis partes, onde a primeira apresenta os requisitos gerais e as outras cinco dizem respeito aos requisitos dos sistemas estrutural, pisos, vedações, coberturas e instalações da edificação (ABNT, 2013).

Hoje, no Brasil, dois grandes programas focados na racionalização do consumo energético através da conscientização do cidadão a respeito da importância de conservar esse recurso se destacam, são eles o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), criado em 1985, com participação significativa da Eletrobrás (BRASIL,

1985), e o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET), que recebe contribuições importantes da Petrobras (BRASIL, 1991). Com auxílio das normas brasileiras supracitadas, o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) é coordenado pelo INMETRO e executado em parceria com o CONPET. Hoje o PBE é composto por 38 Programas de Avaliação da Conformidade, que avaliam a eficiência energética desde equipamentos eletrodomésticos até edificações de grande porte.

2.2.1. Normas de desempenho térmico

A NBR 15220 foi o mais importante documento utilizado para o desenvolvimento dos regulamentos de etiquetagem, pois propôs a utilização do zoneamento bioclimático brasileiro e indicou determinadas soluções técnico-construtivas para cada zona bioclimática, se aproveitando das facilidades e contornando as dificuldades de cada clima brasileiro (ABNT, 2005). Essa proposta sugere que a importância do clima na eficiência energética é relevante, fato que é evidenciado posteriormente nos regulamentos de etiquetagem.

A delimitação das zonas bioclimáticas brasileiras marcou, então, o início das considerações e padronizações de eficiência energética no país. O Brasil foi dividido em oito zonas bioclimáticas, onde cada zona apresentaria padrões de clima semelhantes em todo território o qual delimita. Relativo às estratégias para conforto térmico que foram indicadas para cada zona, como grande parte do país apresenta clima ameno, estratégias passivas, por si só, são capazes de proporcionar conforto térmico em até sete das oito zonas bioclimáticas. Ademais, apenas duas zonas bioclimáticas (as zonas de números 1 e 2), utilizam aquecimento artificial em determinadas épocas do ano (FOSSATI et al., 2016). O estudo desses limites geográficos sugeriu, então, a junção de três informações para cada zona: dados climáticos, zonas de conforto térmico e estratégias construtivas e de projeto voltadas para o aumento do desempenho térmico, proporcionando, assim, considerações importantes para o cálculo das propriedades térmicas dos elementos construtivos das habitações (SOARES, ADAMS, ULLMANN, 2016).

A NBR 15575 é uma norma de avaliação de desempenho aplicável a edificações habitacionais. A norma trata de analisar o edifício como um todo, ou sistemas isolados de interesse, tratando do desempenho térmico, acústico, lumínico e de segurança ao fogo.

Por uma questão de complexidade, os sistemas elétricos são uma exceção a NBR 15575 e são avaliados pela NBR 5410 (ABNT, 2013).

O documento procura estabelecer requisitos, critérios e métodos de avaliação do desempenho dos sistemas que fazem parte da edificação, com o objetivo de analisar se as necessidades do usuário são atendidas. Os requisitos são divididos em três grandes grupos: segurança, habitabilidade e sustentabilidade. O requisito de segurança abrange a segurança estrutural, contra o fogo e no uso e operação; a habitabilidade envolve a estanqueidade, o desempenho térmico, acústico e lumínico, a saúde, higiene e qualidade do ar, a funcionalidade e acessibilidade e o conforto tátil e antropodinâmico; a sustentabilidade trata da durabilidade, manutenibilidade e impacto ambiental. A partir dos resultados obtidos através dessa norma, normas prescritivas oferecem soluções técnicas complementares para atender aos resultados não satisfatórios e para atingir as necessidades do usuário (ABNT, 2013).

A avaliação do desempenho térmico através da NBR 15575 se inicia na NBR 15220-3, onde define-se a zona bioclimática para o estudo do caso. Três métodos são apresentados para dar continuidade à análise: o método de medição, simplificado e de simulação computacional. O método de medição, descrito no Anexo A da NBR 15575-1, tem caráter unicamente informativo, logo, não exclui a necessidade de outros métodos, que tenham caráter normativo. O método simplificado trata dos requisitos e critérios dos sistemas de vedação e cobertura, apresentados na NBR 15575-4 e NBR 15575-5, respectivamente. Caso a transmitância e capacidade térmica e térmica analisadas através do método simplificado excedam o limite estipulado, deve-se partir para o método de simulação computacional, que deve ser aplicado para a edificação como um todo, ignorando o que foi encontrado no método simplificado (ABNT, 2013).

Na NBR 15575, o desempenho térmico é analisado para as condições de verão e de inverno. O valor máximo diário da temperatura dos ambientes de permanência prolongada (APP), para a condição de verão, desconsiderando-se as fontes internas de calor, deve ser menor ou igual ao valor máximo diário da temperatura externa, à sombra, em um típico de verão. Já o valor mínimo da temperatura dos APP para a condição de inverno deve ser maior ou igual ao valor mínimo diário da temperatura externa acrescido de 3°C, para um dia típico de inverno. Uma exceção é implicada às zonas bioclimáticas 6, 7 e 8, que não podem ser avaliadas para as condições de inverno. Assim sendo, caso a edificação em análise encontre-se fora dos limites estabelecidos, recebe a classificação

“Não Atendido” e caso encontre-se dentro dos limites estabelecidos, pode receber a classificação Mínima, Intermediária ou Superior. A Tabela E.2, do Anexo E dessa norma, detalha os intervalos para obtenção do nível Mínimo, Intermediário e Superior (ABNT, 2013).

Para edificações em fase de projeto, a NBR 15575 define que habitações isoladas devem ser avaliadas por completo. Já nos conjuntos habitacionais, devem ser avaliadas apenas as unidades habitacionais representativas. No caso de conjuntos habitacionais térreos, seleciona-se a unidade habitacional que tenha o maior número de paredes expostas ao ambiente externo, enquanto em conjuntos habitacionais multipiso, seleciona-se a unidade habitacional da cobertura que tenha o maior número de paredes expostas ao ambiente externo, considerada como a situação mais crítica. Em uma unidade habitacional todos os ambientes devem ser simulados, inclusive as trocas térmicas entre eles. Quando o ambiente fizer fronteira com outras unidades habitacionais, separados por paredes de germinação ou entrepiso, deve ser considerado que as unidades adjacentes estejam nas mesmas condições térmicas do ambiente em análise, assim, considera-se essas superfícies como adiabáticas (ABNT, 2013).

A norma faz, ainda, considerações a respeito da orientação crítica da unidade habitacional, do posicionamento de janelas e paredes para as condições de verão e de inverno, da desobstrução da habitação por unidades habitacionais vizinhas e da obstrução por elementos construtivos. São definidas taxas de ventilação e renovação do ar, sombreamento, absorvência da radiação solar de superfícies expostas (ABNT, 2013).

Soares, Adams e Ullman (2016) identificaram limitações no método simplificado da NBR 15575 e, a título de comparação, decidiram avaliar uma habitação unifamiliar através do método simplificado e do método de simulação. O método simplificado indicou que os materiais utilizados respeitam os valores mínimos apresentados nas normas NBR 15220 (ABNT, 2005) e NBR 15575 (ABNT, 2013), porém, a simulação identificou que, no período de verão, um dos cômodos não atingiu o nível mínimo de desempenho térmico. Assim sendo, o estudo apontou que há uma divergência entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos e sugeriu que novas análises devem ser realizadas para aperfeiçoar a norma.

2.2.2. Regulamentação para etiquetagem de eficiência energética

Dentro de um contexto internacional de preocupações ambientais surgiram as etiquetas de eficiência energética para edificações, que classificam o nível de eficiência energética de edifícios de acordo com seu respectivo regulamento técnico. Primeiramente surgiram certificados nos países desenvolvidos, como o LEED (*Leadership for Energy and Environmental Design*), americano, e o BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*), inglês, que, apesar de serem originais dos países indicados, são aplicados em diversos outros países, inclusive no Brasil. As nações que lideram os avanços tecnológicos, gradativamente, passaram a impor que medidas de eficiência energética (MEE) fossem aplicadas tanto a edificações em projeto, quanto a edificações que passam por reformas (*retrofit*). Ainda em 2004, 65% das edificações comerciais suíças realizavam *retrofit*, enquanto na França e na Alemanha, o *retrofit* para edificações que ultrapassaram certo limite da vida útil é obrigatório. Metrôpoles americanas, como Nova York, tornaram indispensável a etiquetagem de edificações, assim, o tema foi inserido no contexto econômico das empresas e a aplicação de MEE passa a ser um atrativo para o empreendimento no mercado (MONZONI, VENDRAMINI, 2017).

Com incentivos governamentais, via Decreto nº 4059/2001 (BRASIL, 2001), que regulamenta a Lei de Eficiência Energética, o Procel desenvolveu, em 2003, o “Procel Edifica”, que promove os objetivos do referido decreto em edificações, a fim de torná-las mais sustentáveis. Ainda através do mesmo decreto, criou-se o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE) e o “Grupo Técnico para Eficientização de Energia nas Edificações do País” (GT-Edificações), com o objetivo de regulamentar os procedimentos para avaliação da eficiência energética das edificações e promover o consumo consciente de energia. Em 2005, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) passou a fazer parte do processo e, através de pesquisas relacionadas ao Procel Edifica, foi desenvolvido o mais relevante sistema de etiquetagem de eficiência energética de edificações brasileiro, que concede à edificação um nível de eficiência energética através da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE). Foram, então, desenvolvidos dois procedimentos de etiquetagem em paralelo, um para edifícios comerciais, de serviço e públicos e outro para edifícios residenciais (INMETRO, 2010; INMETRO, 2012).

As etiquetas tiveram como base estudos e normas já concretizados. A ENCE para edificações comerciais, de serviço e públicas é norteadada pelos Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviço e Públicos (RTQ-C), enquanto a ENCE para edificações residenciais tem suas diretrizes estabelecidas pelo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). A primeira versão do RTQ-C foi publicada em 2009 e encontra-se em vigor na Portaria Inmetro nº 372/2010, enquanto o RTQ-R foi lançado em 2010 e encontra-se em vigor a Portaria INMETRO nº 18/2012 (INMETRO, 2010; INMETRO, 2012). Nenhuma etiqueta de edificações era obrigatória, até que, em 2014, como medida de sustentabilidade na administração pública, a etiquetagem nível “A” tornou-se um requisito mandatório para edificações públicas federais em projeto, ou que recebam *retrofit* (MPOG, 2014).

O RTQ-R é pertinente para unidades habitacionais (UH) autônomas, edificações unifamiliares, multifamiliares e áreas de uso comum, em projeto ou construídas. Quando a UH é avaliada em projeto, a mesma deve ser reavaliada após a construção para, então, receber uma etiqueta atualizada. O documento conta com o apoio das oito referidas zonas bioclimáticas para a fundamentação dos seus cálculos. A classificação da eficiência energética, que varia de “A” (mais eficiente) à “E” (menos eficiente), é realizada para os sistemas de envoltória, no verão e no inverno, e de aquecimento de água. A avaliação de inverno é realizada apenas para as edificações que se encontram nas zonas bioclimáticas de 1 a 4. Para obtenção do nível “A” ou “B” dois pré-requisitos devem ser respeitados: medição individualizada de energia e de água. Bonificações são oferecidas para os edifícios que apresentarem alta eficiência energética em ventilação natural, iluminação natural, uso racional de água, condicionamento artificial de ar, iluminação artificial, ventiladores de teto, refrigeradores e medição individualizada (INMETRO, 2012). Segundo relatório técnico elaborado por Fossati e Lamberts (2011), as etiquetas são realizadas, regularmente, antes da ocupação e da instalação dos sistemas de iluminação, condicionamento de ar e equipamentos eletrodomésticos, portanto, esses subsistemas são avaliados como bonificações, caso já estejam instalados durante a etiquetagem.

Para avaliar a envoltória através do RTQ-R, inicialmente, realiza-se uma inspeção dos valores absorptância solar, transmitância térmica, capacidade térmica e, ainda, considerações sobre a ventilação e iluminação natural. Todos os parâmetros inspecionados devem respeitar limites mínimos e máximos para a utilização do método

prescritivo do regulamento, em caso contrário, deve-se utilizar o método de simulação. A classificação da envoltória pelo método prescritivo faz o uso de regressões lineares múltiplas para calcular pontuações que representam o desempenho de cada um dos sistemas de maior relevância para a eficiência energética. A análise térmica é dividida por APP, assim, cada ambiente assume características particulares, como a direção da fachada, e avaliam-se dois indicadores em condições de ventilação natural (graus-hora para resfriamento, avaliado para o verão, e consumo relativo para aquecimento, avaliado para o inverno) e um indicador em condições de condicionamento artificial (consumo relativo para refrigeração). São estabelecidos, ainda, equivalentes numéricos que levam em consideração a área útil de cada ambiente para que se possa realizar o somatório ponderado dos indicadores de todos os APP e, finalmente, chegar a avaliação final da envoltória como um todo (INMETRO, 2012).

No RTQ-R, o sistema de aquecimento de água passa por uma inspeção de pré-requisitos que, basicamente, define uma espessura mínima de isolamento de tubulações para aquecimento de água. As edificações que não cumprem com os pré-requisitos referentes às tubulações se limitam a receber no máximo nível “C” de eficiência energética para esse sistema. Respeitados os pré-requisitos, através de cálculos e de equivalentes numéricos, determina-se a eficiência energética desse sistema. A ENCE aborda diversos tipos de sistema de aquecimento de água, que são: aquecimento solar, a gás (individual ou coletivo), elétrico, através de bombas de calor e de caldeiras a óleo. A eficiência energética desse sistema, quando utilizado aquecimento solar, pode ser realizada através do método de dimensionamento ou de simulação. Os sistemas de aquecimento elétrico recebem classificação máxima de nível de eficiência “D”, enquanto sistemas de aquecimento de água através de caldeiras a óleo recebem, automaticamente, classificação nível “E”. Semelhante ao que se faz para a envoltória, calcula-se os equivalentes numéricos para ponderar a influência de cada subsistema de aquecimento para, enfim, somá-los e chegar a classificação final do sistema como um todo (INMETRO, 2012).

Para finalizar o processo de etiquetagem de edificações residenciais através do RTQ-R, o país é dividido nas cinco regiões geográficas tradicionais (norte, nordeste, centro-oeste, sudeste e sul) e cada região recebe um peso de cálculo para os sistemas de envoltória e de aquecimento de água. As regiões de clima mais quente, como as regiões norte e nordeste do país, dão maior peso à envoltória e, à medida que se desloca para o

sul e o clima tende a esfriar, o sistema de aquecimento de água torna-se mais influente na classificação da eficiência energética, enquanto a envoltória torna-se menos influente. A classificação do nível de eficiência da edificação é finalizada, então, fazendo-se a soma ponderada das classificações dos sistemas de envoltória e de aquecimento de água, de acordo com as cinco regiões geográficas, estabelecidas pelo IBGE (INMETRO, 2012).

Fossati et al. (2016) identificaram que em algumas situações a edificação em análise apresenta alguns ambientes que são condicionados naturalmente, avaliados a partir do indicador graus-hora para resfriamento, e outros que são condicionados artificialmente, avaliados a partir do indicador consumo relativo para aquecimento e refrigeração. Uma estratégia quando aplicada a ambientes naturalmente ventilados pode gerar resultados opostos à mesma estratégia aplicada a ambientes artificialmente condicionados, ou seja, estratégias que favorecem o conforto térmico podem gerar consumos de energia excessivos. A avaliação dos ambientes através de indicadores diferentes impossibilita a comparação dos resultados e dificulta a sua compreensão, principalmente para os usuários. Além disso, o método de regressão linear não é a melhor alternativa para lidar com variáveis não-lineares. Feita uma análise através de métodos estatísticos mais avançados, identificou-se que o regulamento vigente subestima a eficiência energética de edificações residenciais naturalmente ventiladas e superestima a eficiência energética de edificações residenciais artificialmente condicionadas.

É difícil prever com acurácia o consumo energético das edificações, já que a estimativa da carga térmica e do próprio consumo energético envolve diversas variáveis que se correlacionam. Para realizar essa previsão com acurácia, utilizam-se diversos métodos, dentre os quais estão os métodos de engenharia, métodos estatísticos, ou empíricos, e os métodos a partir de redes de inteligência artificial, ou metamodelos. Os métodos de engenharia dependem de diversos princípios termo-físicos, para tanto, é necessário o uso de equações e suposições que representem esses princípios, de forma que essas suposições criam incertezas inconvenientes. Os métodos estatísticos, ou empíricos utilizam dados históricos para realizar as avaliações, sendo que a falta de dados gera resultados inacurados. Os métodos a partir de inteligência artificial, os metamodelos, são os mais aplicados e apresentam os melhores resultados para solução de equações não-lineares (BAKAR et al., 2015).

Pouey, Brandalise e Silva (2012) compararam os resultados obtidos pela aplicação dos métodos prescritivo e de simulação do RTQ-R em uma residência

unifamiliar, composta por quatro zonas térmicas, sendo elas uma sala, um dormitório de casal, um dormitório de solteiro e um mezanino. A pesquisa concluiu que para os equivalentes numéricos de aquecimento, por ambos os métodos, se obteve nível “A” de eficiência para todos os APP, porém, para os equivalentes numéricos de resfriamento, os resultados encontrados foram discrepantes, já que através do método de simulação se obteve nível “A” para todos os ambientes analisados, enquanto o método prescritivo indicou nível “B” para a sala e nível “C” para os dormitórios e mezanino. Nesse estudo, ficou evidente que algumas características peculiares de projeto podem ser inseridas no método de simulação a fim de, por atitude de má fé profissional, manipular os resultados da simulação, sendo que a manipulação pode ser mais frequente em residências unifamiliares, onde a variação de geometria e a conexão entre zonas térmicas é enorme, assim as manobras de má fé podem passar despercebidas.

Ghisi e Silva (2014) realizaram a avaliação do desempenho térmico de uma habitação unifamiliar fictícia de interesse social, em Florianópolis, através do método de simulação da NBR 15575 e do RTQ-R, para diferentes propriedades térmicas da envoltória, com o objetivo de identificar se ocorrem divergências de resultado entre os métodos e para quais condições da envoltória essas divergências são mais discordantes. O estudo expôs um caráter de subjetividade da NBR 15575, que não especifica claramente alguns detalhes dos parâmetros de entrada necessários para que o programa de simulação (EnergyPlus) trabalhe com maior acurácia. A norma não define, por exemplo, dados de radiação solar direta, global e tipo de céu, sendo que essas informações são necessárias para a elaboração do dia típico de projeto através do EnergyPlus. Como a NBR 15575 e o RTQ-R utilizam metodologias diferentes, Ghisi e Silva propuseram três cenários de forma a fazer uma comparação indireta dos resultados obtidos. No primeiro cenário os níveis “A”, “B” e “C”, do RTQ-R são comparados, respectivamente, com o Superior, Intermediário e Mínimo da NBR 15575 e os níveis “D” e “E” com o “Não Atendido”. No segundo cenário os níveis “A” e “E” do regulamento são comparados ao Máximo e Mínimo da norma e os níveis “B”, “C” e “D” correspondem a classificação Intermediária. No terceiro cenário o nível “A” é comparado com o Superior, “B” e “C” com Intermediário, “D” com Mínimo e “E” com “Não Atendido”. Dos resultados encontrados, dois entre os três cenários apresentaram grande parte das avaliações divergindo quando aplicados os métodos de simulação da NBR 15575 e do RTQ-R. Na tabela de classificação da norma identificou-se um nível alto de exigência para as condições de

inverno e baixo para as condições de verão, enquanto as exigências da tabela de classificação do regulamento assumem tendências opostas, tal que no RTQ-R a exigência de graus-hora de resfriamento é alta, enquanto a exigência para o consumo com aquecimento é baixa. O trabalho sugeriu, então, que modificações apropriadas nas tabelas de classificação final de ambos os métodos (norma e regulamento) proporcionariam maior concordância entre os resultados.

Loura, Assis e Bastos (2011) realizaram um estudo em uma edificação multifamiliar hipotética, no Rio de Janeiro, para tecer comparações entre o método prescritivo de avaliação da envoltória do RTQ-R e o método normativo simplificado de avaliação de vedações externas e sistemas de cobertura da NBR 15575, de 2008, a fim de identificar as principais discrepâncias entre eles. Como a norma e o regulamento têm abordagens diferentes, já se esperava que os resultados divergissem, porém, os resultados encontrados se distanciaram ainda mais do que o esperado. Na avaliação da NBR 15575, obrigatória, a habitação não alcançou sequer a classificação mínima, enquanto na avaliação do RTQ-R, a habitação recebeu nível “B” de eficiência energética. Como o nível “B” do RTQ-R representa o segundo patamar de maior eficiência, uma grande contradição entre os resultados ficou explícita.

O trabalho de Loura, Assis e Bastos (2011) deixou nítida a importância de uma reavaliação do regulamento, entretanto, percebe-se que a NBR 15575 também deve ser examinada, pois necessita de dados de entrada pouco específicos e exige padrões de eficiência energética menos rigorosos das edificações avaliadas. Além disso, a NBR 15575 é um documento mais antigo e pouco atualizado, enquanto o RTQ-R é um documento mais recente, que se adapta melhor às diversificadas condições climáticas e às necessidades que se espalham pelo território brasileiro.

Mazzaferro et al. (2018) identificaram que o método prescritivo do RTQ-R superestima o consumo de aquecimento e não permite o uso híbrido de ventilação natural e condicionamento artificial. Além disso, o indicador de graus-hora é pouco compreendido pelos consumidores, que têm dificuldade de associá-lo ao consumo ou à economia de energia.

Vide as limitações do RTQ-R e os erros gerados pelo metamodelo presente, desde 2012 os regulamentos técnicos de qualidade supracitados foram estudados pelo Procel Edifica e pelo Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E), em parceria com o Laboratório de Eficiência Energética (LabEEE) da UFSC, pois

acreditava-se que o indicador de desempenho precisava de ajustes para que melhor representasse a eficiência energética dos edifícios aos quais é aplicada (CB3E, 2017).

A nova proposta do RTQ-R, a Instrução Normativa Residencial do INMETRO (INI-R), que entrará em consulta pública no próximo ano, sugere que a classificação de eficiência energética utilize a energia primária como base comparativa entre a edificação real e uma condição de referência, que, determinada a partir das definições e limites da NBR 15575, representa a classe “C” de eficiência energética. Dessa maneira, computa-se a energia elétrica e térmica nos cálculos para, através de fatores de conversão, transformá-las em energia primária, a fim de operá-las em conjunto e chegar a um único valor representativo do consumo energético (INMETRO, 2018). Essa proposta divide o Brasil em 24 grupos climáticos (GCL), sendo que o primeiro GCL foi dividido em dois subgrupos (“1-A” e “1-B”). Tendo em vista que as características climáticas dentro de um mesmo GCL são mais homogêneas que as características pertinentes às zonas bioclimáticas do RTQ-R, acredita-se que os resultados obtidos serão mais acurados, já que o clima é um fator importante na estimativa do consumo.

A INI-R é aplicável a unidades residenciais unifamiliares, unidades habitacionais autônomas de edificações multifamiliares, em projeto ou construídas. Essa nova proposta avalia os sistemas de envoltória e aquecimento de água. A título informativo, pode-se analisar também a geração local de energia renovável, o uso racional de água e a emissão de dióxido de carbono. Para tal avaliação, dispõe-se de três métodos: prescritivo, simplificado e de simulação. O método prescritivo, desenvolvido para residências unifamiliares de até 60 m², se trata de uma lista de controle onde todos os itens devem ser cumpridos para se obter o nível de eficiência energética “A”, sendo que, caso qualquer item seja desrespeitado, outro método deve ser utilizado (INMETRO, 2018).

O método simplificado da INI-R se diferencia dos outros pois prediz as cargas térmicas de aquecimento e resfriamento e o percentual de horas em conforto térmico (PHOCT) para salas e dormitórios, através de metamodelos gerados por redes neurais artificiais (RNA), desenvolvidos por Mazzaferro et al. (2018). No seu trabalho, a equipe expôs o desenvolvimento da RNA, que foi elaborada por um banco de dados de 60.000 simulações modeladas no *EnergyPlus*, geradas pelo método de amostragem do Hipercubo Latino. Nas simulações foram utilizadas ferramentas avançadas, como o *Energy Management System* (EMS), que cria interações entre o usuário e a edificação, como a

abertura de janelas ou acionamento do sistema de condicionamento de ar em determinadas faixas de temperatura, permitindo, assim, sistemas de climatização híbrida, onde a ventilação natural e o sistema de condicionamento de ar são levados em consideração. Para predizer as cargas térmicas de aquecimento e resfriamento da edificação, o modelo exige que se insira o GCL no qual o edifício está inserido, além de 28 variáveis de entrada, que envolvem as características geométricas e térmicas dos componentes construtivos de cada APP (INMETRO, 2018).

A partir das cargas térmicas, previstas pelo metamodelo, calcula-se o consumo energético dos APP na condição real e de referência. Para classificar as UH é preciso fazer a ponderação da área de cada APP para encontrar o consumo da UH real e de referência e, enfim, compará-los. O valor final do consumo real é comparado à edificação de referência, assim, o edifício real é classificado de “A” (mais eficiente) a “D” (menos eficiente), de acordo com a redução do consumo da condição de referência para a condição real (INMETRO, 2018).

Quando nenhum dos outros métodos é aplicável, utiliza-se o método de simulação, que é mais complexo e exige maior capacidade técnica do analista. Nesse método a estimativa da carga térmica para as condições real e de referência é realizada através de programas de simulação energética, como o *EnergyPlus*. Todos os outros procedimentos de cálculo para o consumo energético e para o nível de eficiência energética são similares ao método simplificado (INMETRO, 2018).

2.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Segundo Saltelli et al. (2000), a análise de sensibilidade pode ser definida como “o estudo da importância relativa de diferentes parâmetros de entrada nos resultados de um modelo”. A análise de sensibilidade é uma ferramenta valiosa que pode ser aplicada na análise energética de edificações, sendo que, pode ser dividida em dois grupos de maior relevância: local e global. A análise de sensibilidade local investiga a influência de um parâmetro de entrada (variável independente) específico, inserido em um caso base determinado, sobre um parâmetro de saída (variável dependente), enquanto a análise de sensibilidade global investiga a influência de todos os parâmetros de entrada do espaço amostral, sobre um parâmetro de saída (TIAN, 2013).

Atualmente a análise de sensibilidade local é a mais disseminada e aplicada, todavia, esse tipo de análise não é sugerido quando o objetivo é identificar a influência relativa de diferentes parâmetros de entrada em um parâmetro de saída. Para esses casos, a análise de sensibilidade global é mais indicada, pois cobre todo o espaço amostral dos parâmetros de entrada. Uma das limitações do uso da análise de sensibilidade global é o caso onde uma grande lista de parâmetros de entrada gera uma grande quantidade de parâmetros de saída, nessa circunstância é necessário realizar uma análise de sensibilidade global para cada parâmetro de saída, tornando o processo excessivamente custoso (SALTELLI, TARANTOLA, CAMPOLONGO, 2000).

Através da análise de sensibilidade global, onde variam-se todos os parâmetros, é possível obter-se a interferência dos parâmetros de entrada entre si e em relação ao parâmetro de saída em estudo (SALTELLI, TARANTOLA, CAMPOLONGO, 2000). Esse tipo de análise de sensibilidade permite identificar quais são os parâmetros de entrada mais importantes (priorização de variáveis) para a variância do parâmetro de saída e quais são os parâmetros de entrada menos importantes (fixação de variáveis), obtendo-se, assim, estimativas mais precisas sobre a influência dos parâmetros de entrada sobre o parâmetro de saída (SILVA, 2016).

De acordo com Saltelli, Tarantola e Campolongo (2000), um modelo só faz sentido quando os parâmetros de entrada de fato influenciam os parâmetros de saída, para tanto, a análise de sensibilidade global pode ser utilizada para verificar se a alteração dos parâmetros de entrada do modelo em questão varia, consideravelmente, o parâmetro de saída, e se essa variação tem sentido físico. Nesse estudo, os autores comentam sobre a importância da análise de sensibilidade global na identificação do modelo e em aferir os parâmetros de entradas, já que esse processo pode ser realizado através de experimentos computacionais de baixo custo e os resultados podem ser comparados a outros experimentos empíricos e validados. Nesse caso, a análise de sensibilidade serve como um método de calibração.

Dentre diversos métodos de análise de sensibilidade, o método de Sobol (1990) é capaz de estimar a sensibilidade total, que representa a soma de todos os efeitos (primeira ordem até ordens superiores) de cada parâmetro envolvido, sem a necessidade de estimar os efeitos de ordens superiores individualmente. Para tanto, o método utiliza-se de uma matriz com os dados de entrada e um vetor com os dados de saída. A matriz é gerada pelo método de amostragem de Sobol, onde cada coluna representa a distribuição

estatística de cada um dos parâmetros de entrada envolvidos no processo e cada linha representa o conjunto de parâmetros de entrada necessários para obter-se o parâmetro de saída, permitindo que, com uma quantidade “k” de parâmetros de entrada atinja-se efeitos de ordem máxima “k” (SALTELLI et al., 2000). Sendo os efeitos de primeira ordem definidos como a fração de variância esperada caso apenas um determinado parâmetro não seja conhecido, o efeito total é definido como a fração de redução da variância esperada quando um determinado parâmetro é conhecido.

Se o objetivo do estudo é identificar quais fatores de entrada não são importantes para o modelo, utiliza-se a sensibilidade total, em contrapartida, se o objetivo é encontrar o fator de entrada mais importante para variar determinado parâmetro de saída, utiliza-se a sensibilidade de primeira ordem (TIAN, 2013). Na análise de sensibilidade de Sobol cada efeito de ordem pode assumir o valor máximo de 1, enquanto o efeito total pode se apropriar de valores maiores do que 1 (SALTELLI, TARANTOLA, CAMPOLONGO, 2000).

Mara e Tarantola (2008) realizaram a calibração de um modelo para simulação térmica de edificações, onde 35 parâmetros de entrada geraram 10 parâmetros de saída, através de análises de sensibilidade global baseadas na variância, inclusive utilizando o método de Sobol, assim, estimaram os efeitos de primeira ordem, de ordens superiores e a sensibilidade total. O estudo concluiu que o modelo estava apto a prever a temperatura interna de ambientes, porém, inapto a prever a transferência de calor em coberturas. Além disso, os autores motivaram os pesquisadores a aplicar a análise de sensibilidade global durante o desenvolvimento de modelos de desempenho térmico em edificações.

Knaap (2011) aplicou a análise de sensibilidade global na última fase do seu estudo de comparação entre a carga térmica de superaquecimento, aquecimento e resfriamento, obtidas através dos métodos prescritivo e de simulação do RTQ-R. Os resultados encontrados indicaram que houve divergência entre a sensibilidade dos parâmetros de entrada quando avaliados pelos diferentes métodos. Tanto para o método simplificado quanto para o método de simulação, as cargas térmicas apresentaram-se extremamente sensíveis à absorção solar da envoltória. Entretanto, a divergência foi evidenciada na análise de sensibilidade do parâmetro de entrada que se referia a capacidade térmica da envoltória, que obteve grande importância no método simplificado, mas pouca importância no método de simulação.

Devido à falta de estudos sobre a análise de sensibilidade global aplicada à avaliação de eficiência energética em edificações, Silva e Ghisi (2013) se propuseram a elaborar essa pesquisa, para tanto, verificaram quais parâmetros de entrada são mais influentes na eficiência energética de uma edificação residencial quando aplicado o método de simulação do RTQ-R. O resultado do trabalho indicou que os parâmetros de saída em análise, graus-hora de resfriamento e consumo relativo com aquecimento e com refrigeração, são mais sensíveis à absortância solar e à emissividade da cobertura. Esse tipo de análise facilita a otimização da eficiência energética em residências, já que, com a importância de cada variável em mãos, os projetistas tendem a economizar esforços para alcançar a eficiência energética. Segundo os autores, esse tipo de análise pode contribuir, ainda, para o aperfeiçoamento da escala de classes de eficiência energética presentes no RTQ-R e em regulamentações desse gênero.

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A população e o poder aquisitivo crescem, principalmente em países emergentes, como o Brasil. O déficit habitacional brasileiro atingiu 6,4 milhões de domicílios e programas como o MCMV foram elaborados para que a população de baixa renda deficitária seja realocada a domicílios nos próximos anos. Portanto, acredita-se que o consumo energético nacional do setor residencial deve aumentar nos anos que seguem.

Duas alternativas são propostas para solucionar a crise energética: aumentar a produção energética e/ou diminuir a demanda por energia. Para aumentar a produção deve-se extrair energia de fontes não renováveis e poluentes ou investir no avanço tecnológico para a obtenção de energia a partir de fontes renováveis, cuja oferta varia com as oscilações ambientais. Logo, diminuir a demanda energética prova-se como uma alternativa viável.

Tendo em vista a alta representatividade das edificações na demanda de energia primária nacional e a participação significativa das residências no consumo energético total de edificações, entende-se que uma vasta quantidade de energia pode ser economizada com a escolha correta dos componentes construtivos em fase de projeto, ou com a aplicação de medidas de eficiência energética em *retrofit*. A busca por eficiência energética tornou-se o alvo de grandes economias, que procuram diminuir a demanda

energética e reduzir a emissão de gases poluentes, a fim de alcançar um sistema sustentável.

Normas e regulamentações com o propósito de incentivar a eficiência energética de edificações foram desenvolvidas a nível internacional. No Brasil, uma nova proposta para o RTQ-R, a INI-R, entrará em consulta pública no próximo ano. A fim de incentivar a etiquetagem de edificações residenciais, essa proposta oferece o método simplificado, que substitui o antigo método prescritivo e que conta com um metamodelo eficiente para prever as cargas térmicas, permitindo a aplicação do método de forma rápida e acurada, sem exigir a habilidade em programas de engenharia avançados.

É importante que a nova proposta de regulamento seja amplamente testada, para que se prove sua acurácia e se entenda o seu domínio de validade. Além disso, entender a influência dos parâmetros de entrada para a predição da carga térmica de edificações de baixa renda através do metamodelo, utilizado no método simplificado da INI-R, consiste em uma maneira de instruir os projetistas na escolha de medidas de eficiência energética adequadas e na tomada de decisões.

3. MÉTODO

O método desse trabalho de conclusão de curso foi dividido em três partes:

1. Dados de entrada: definição da tipologia base da habitação de interesse social (HIS) que será estudada;
2. Método simplificado: detalhamento do procedimento de cálculos para a análise da eficiência energética do caso base, obedecendo às diretrizes do método simplificado da Instrução Normativa Residencial do INMETRO (INI-R);
3. Análise de sensibilidade: descrição da influência dos parâmetros de entrada sobre a carga térmica de resfriamento para a tipologia base;

Os cálculos do método simplificado da INI-R foram realizados através da linguagem de programação R, versão 3.5.1, acoplada a plataforma RStudio, versão 1.2.904. Esse programa dá suporte à linguagem e facilita a visualização das variáveis envolvidas no processo, assim, sistematiza e automatiza o procedimento oferecendo agilidade nos cálculos e possibilita a variação dos dados de entrada em grande escala, de modo a tornar viável o desenvolvimento de milhares de casos para posteriores análises estatísticas.

A predição das cargas térmicas de aquecimento e resfriamento foi realizada através das mesmas redes neurais artificiais (RNA) que suportam as plataformas de predição online disponibilizadas pelo PBE Edifica, no sítio <http://pbeedifica.com.br/redes/residencial/>, desenvolvidas pelo Centro Brasileiro de Eficiência Energética em parceria com o Laboratório de Eficiência Energética da UFSC. Nesse trabalho as RNA foram atreladas a um código em linguagem R, agilizando consideravelmente o processo e permitindo uma análise ampla dos dados.

Foi realizada, então, a análise de sensibilidade global dos parâmetros de entrada do método simplificado sobre a carga térmica de resfriamento utilizando-se do método de Sobol e da linguagem de programação Python, versão 3.7.0, com auxílio da linguagem R para o processamento e a visualização dos dados. Para realizar essa análise foi preciso desenvolver uma amostragem “quase randômica” de parâmetros de entrada, para tanto, foi utilizada a biblioteca SALib, via Python. Os resultados das predições das cargas térmicas, através das RNA em R, foram exportados novamente para o Python onde,

finalmente, foi aplicada a análise de sensibilidade de Sobol, fazendo uso da mesma biblioteca.

A partir da mesma amostragem utilizada para a análise de sensibilidade, os parâmetros de entrada para a predição das cargas térmicas de resfriamento foram fixados em valores discretos. Foram selecionadas, então, todas as UH com parâmetro de entrada igual aos valores fixados, a fim de estimar a variação média das cargas térmicas de resfriamento entre as unidades habitacionais (UH) selecionadas.

3.1. DADOS DE ENTRADA

Triana (2016), em sua tese de doutorado, elaborou uma compilação de dados referentes a habitações de interesse social (HIS) brasileiras através do Censo de 2010, a fim de desenvolver projetos representativos, por faixa de renda, das tipologias mais utilizadas no programa “Minha Casa Minha Vida” (MCMV), analisar seu desempenho térmico presente, avaliar a influência das mudanças climáticas na eficiência energética futura e realizar a análise do ciclo de vida das edificações com influência das mudanças climáticas de forma mais integrada. Esses projetos foram utilizados nas etapas seguintes da própria tese e podem ser utilizados em trabalhos futuros que envolvam HIS.

Os projetos compilados por Triana (2016) foram divididos em três níveis de renda: Nível 1 (renda familiar de até R\$1.600,00) e Nível 2 (renda familiar de até R\$5.000,00). Inicialmente, o Nível 2 abrangia as duas faixas de renda, porém, encontraram-se projetos similares do MCMV para rendas de R\$1.600,00 à R\$5.000,00, assim as duas faixas de renda compuseram o Nível 2.

Para construir o cenário das edificações do Nível de renda 1 foram utilizadas duas amostras a partir de fontes distintas: a Amostra 1, que foi desenvolvida a partir de uma pesquisa na internet, que reuniu dados divulgados pela instituição financiadora dos projetos do MCMV, a Caixa Econômica Federal, identificando as principais tipologias já construídas, e a Amostra 2, que se refere aos projetos solicitados que ainda não foram executados, mas que formam um possível cenário para um futuro próximo. Os dados da Amostra 3 referem-se ao Nível 2 de renda e foram levantados de forma similar às Amostras 1 e 2, porém, como houve uma grande predominância de edificações multipisos e multifamiliares, foram identificados e considerados apenas os apartamentos tipo, que se repetem e representam a tipologia de forma geral, desconsiderando-se, assim,

apartamentos térreos e coberturas duplex, por exemplo, que não são representativos para essa faixa de renda (TRIANA, 2016).

Através das médias, e de seus respectivos desvios padrão, e das modas dos dados encontrados, foram elaborados projetos representativos com as características arquitetônicas mais frequentes de cada tipologia presente nos dois níveis de renda. Dentre as edificações verticalizadas de baixa renda, especificamente do Nível 1, como sugere Triana (2016), a tipologia mais disseminada pelo programa MCMV é a tipologia H de quatro a cinco pavimentos. Como a diferença entre os edifícios de quatro e de cinco pavimentos é, basicamente, de um pavimento tipo com características térmicas semelhantes, para facilitar o desdobramento desse trabalho foi escolhido, então, analisar a eficiência energética do projeto representativo da tipologia H de quatro pavimentos.



Figura 1 – Caso base: tipologia H típica do Nível de renda 1, representada no Revit.

Fonte: Triana (2016).

A pesquisa de Triana (2016) identificou que a tipologia H é muito comum em diversas regiões brasileiras. Especificamente, foram identificadas 2.000 edificações na região Norte, 7.566 no Nordeste, 1.056 no Centro Oeste e 5.100 no Sudeste. Sendo assim, o método, para este trabalho, foi aplicado para as quatro regiões onde essa tipologia é disseminada, sendo que foi escolhido um grupo climático representativo para cada uma das quatro regiões analisadas.

Para esse trabalho, a cidade de São Paulo (SP) foi escolhida como representante da região Sudeste, Cuiabá (MT) como representante do Centro Oeste, Salvador (BA)

representou o Nordeste e Manaus (AM) representou o Norte do país. A decisão foi realizada a partir da disponibilidade dos arquivos climáticos e do tamanho da população que essas cidades atingem.

Segundo a INI-R, o nível de eficiência energética é obtido comparando-se os consumos de energia primária da envoltória do sistema de aquecimento de água da edificação real com a condição de referência, representada por uma edificação hipotética com geometria similar à condição real, que assume o nível de eficiência energética “C” (INMETRO, 2018). O percentual do consumo da envoltória e do aquecimento de água da condição de referência para a condição real define, então, o nível de eficiência energética da envoltória e do sistema de aquecimento de água da edificação, respectivamente. Posteriormente, esses resultados foram acoplados para que se chegasse ao nível de eficiência energética final da UH.

Sendo assim, o primeiro passo para a aplicação do regulamento foi definir as características da condição real para, posteriormente, definir-se as características da condição de referência.

3.1.1. Condição real

O edifício base possui 4 andares e tem pé-direito de 2,50 m. A fachada frontal da edificação possui 17,62 m, enquanto a fachada lateral possui 13,60 m. Cada pavimento conta com quatro habitações tipo e com um corredor de circulação entre as habitações de cada pavimento, com área útil de 17,28 m². No total, a edificação soma 16 HIS, sendo que os cômodos de cada habitação tipo possuem a mesma área útil. Cada habitação possui dois dormitórios, sendo que o maior, posicionado na esquina do edifício, possui área útil de 9,00 m², e o menor, possui área útil de 8,57 m², um ambiente com a sala e a cozinha integradas, que apresenta área útil de 20,11 m², um banheiro de 3,41 m² e uma pequena área de circulação interna de 3,15 m². A área de serviço é acoplada à cozinha e sua área foi incorporada à área da sala e cozinha integradas.

Cada dormitório das UH dos casos base possui uma janela de correr de 2 folhas com 1,44 m², com fator de ventilação (FV) de 0,45. A sala de estar possui uma janela de correr de 2 folhas de 1,60 m² com janela fixa embaixo, com FV de 0,375. A cozinha possui uma janela de correr de 2 folhas de 1,20 m², com FV de 0,45, enquanto o banheiro possui uma janela basculante de 0,36 m². Todas as janelas possuem peitoril à altura de

1,10 m e fator de iluminação de 0,80, exceto pelas janelas dos banheiros que têm peitoril de 1,50 m. Todas as esquadrias das janelas são em alumínio e os vidros transparentes de 3 mm. Todas as portas são do mesmo modelo, com as dimensões 0,80 x 2,10 cm, em madeira.



Figura 2 – Pavimento tipo e habitação tipo da tipologia H de nível de renda 1. Fonte: adaptado do projeto de AutoCAD utilizado em Triana (2016).

A cobertura possui telhado em fibrocimento, sendo que o ático é constituído por estrutura metálica com forro de laje em concreto de 10 cm. As propriedades térmicas da cobertura são: transmitância térmica de $2,02 \text{ W/m}^2\text{K}$, capacidade térmica de $233 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ e absorvância solar de 0,7. A laje do andar térreo e as entrelajes possuem transmitância térmica de 3,24 e $3,77 \text{ W/m}^2\text{K}$, respectivamente, e capacidade térmica de 231,48 e $201,48 \text{ kJ/m}^2\text{K}$, respectivamente. As paredes são de painel de concreto de 10 cm, com transmitância térmica de $4,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ e capacidade térmica de $240 \text{ kJ/m}^2\text{K}$. Foi utilizada a absorvância do concreto (0,6) para as paredes externas. A edificação possibilita o uso de ventilação cruzada.

O sistema de aquecimento de água é individual e faz uso de aquecedores de passagem a gás natural, com potência de 21 kW e rendimento de 84%. O modelo do aquecedor é o AG13NM1 da marca Integral, com capacidade de vazão 12,5 L/min, como consta na Tabela que segue (INMETRO, 2017).

Empresa	Marca	Modelo	Capacidade de Vazão (litros / min)	Tipo de Gás	Consumo Máximo de Gás GN (m³ / h) GLP (kg / h)	Diâmetro da Chaminé (mm)	Potência (kcal / h)	Potência (kW)	Rendimento (%)	Classificação PBE	Selo CONPET Classificação = A
ASTRA	INTEGRAL	AG6LM1	6,0	GLP	0,73	90	8.600	10,0	84	A	SIM
ASTRA	INTEGRAL	AG13LM1	12,5	GLP	1,52	60	18.060	21,0	84	A	SIM
ASTRA	INTEGRAL	AG13NM1	12,5	GN	1,90	60	18.060	21,0	84	A	SIM

Tabela 1 – Extraída da Tabela de consumo e eficiência energética de aquecedores de água a gás instantâneos. Fonte: INMETRO (2017).

3.1.2. Condição de referência

As dimensões de volume, as áreas dos ambientes de permanência prolongada (APP) e os pés-direito da condição de referência devem ser semelhantes às características da condição real, entretanto, as propriedades térmicas e construtivas variam, como sugere a Tabela 2. Ressalta-se que a condição de referência é baseada nos limites mínimos da NBR 15.575 (ABNT, 2013).

	CONDIÇÃO REAL			CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA		
	Sala-Cozinha	Dormitório maior	Dormitório menor	Sala-Cozinha	Dormitório maior	Dormitório menor
Área envidraçada (m²)	2,80	1,44	1,44	Norte: 5,58 Nordeste e Sudeste: 3,72 Centro-Oeste e Sul: 3,26	Norte: 2,16 Nordeste e Sudeste: 1,44 Centro-Oeste e Sul: 1,26	Norte: 2,06 Nordeste e Sudeste: 1,37 Centro-Oeste e Sul: 1,20
Transmitância térmica dos vidros (W/m²K)	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
Fator solar dos vidros	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
Fator de ventilação	0,407	0,45	0,45	0,5	0,5	0,5
Fator altura da abertura	0,48	0,48	0,48	0,4	0,4	0,4
Capacidade térmica das paredes externas (kJ/m²K)	240	240	240	50 ~ 200 (Média)	50 ~ 200 (Média)	50 ~ 200 (Média)
Transmitância térmica das paredes externas (W/m²K)	4,4	4,4	4,4	3,65	3,65	3,65
Absortância das paredes externas	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Capacidade térmica da cobertura (kJ/m²K)	233	233	233	0 ~ 50 (Leve)	0 ~ 50 (Leve)	0 ~ 50 (Leve)
Transmitância térmica da cobertura (W/m²K)	2,06	2,06	2,06	2,02	2,02	2,02
Absortância da cobertura	0,7	0,7	0,7	0,4	0,4	0,4
Capacidade térmica da laje térrea (kJ/m²K)	231,5	231,5	231,5	231,5	231,5	231,5
Transmitância térmica da laje térrea (W/m²K)	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24
Capacidade térmica das entrelajes (kJ/m²K)	201,5	201,5	201,5	201,5	201,5	201,5
Transmitância térmica das entrelajes (W/m²K)	3,77	3,77	3,77	3,77	3,77	3,77
Projeção horizontal da marquise ou sacada	0	0	0	0	0	0
Tipo do sistema aquecimento de água	A gás	A gás	A gás	Elétrico	Elétrico	Elétrico
Eficiência do aquecedor	0,84	0,84	0,84	0,95	0,95	0,95

Tabela 2 – Resumo das características da condição real e de referência para o caso base.

A condição real não respeitou os limites para a aplicação do método simplificado, portanto, essa questão será abordada no item 3.2 desse texto.

Além da Tabela 2, algumas informações complementares devem ser indicadas para definir a condição de referência, como segue:

- As aberturas nas fachadas dos APP respeitam os limites mínimos estabelecidos pela NBR 15.575-4 (ABNT, 2013), variando entre as regiões brasileiras, e devem permanecer na mesma fachada que a condição real. Sendo assim, os valores seguem os instruídos na Tabela 2, na linha que se refere à área envidraçada;
- As aberturas não têm sombreamento;
- Não são consideradas perdas de carga nas tubulações do sistema de aquecimento de água.

3.1.3. Zonas térmicas

Cada UH foi dividida em três zonas térmicas, sendo que uma refere-se ao conjunto sala-cozinha e as outras duas referem-se cada qual a um quarto, como ilustra a Figura 3. Essa divisão se repete em todas as UH de todos os pavimentos, para todos os climas.

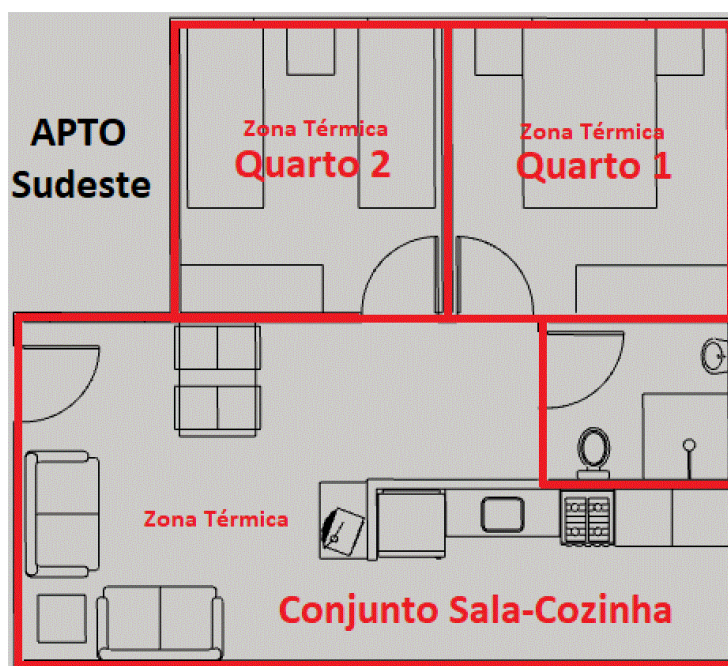


Figura 3 – Zonas térmicas na habitação caso base. Fonte: adaptado do projeto de *AutoCAD* utilizado em Triana (2016).

As habitações possuem área útil pequena, os sistemas de condicionamento de ar dos cômodos são considerados semelhantes e os valores de DPI e DPE dos cômodos possuem valores próximos, portanto, a área de cada zona térmica foi dividida convencionalmente, como indicado, dispensando-se o uso do conceito de zona térmica perimetral estabelecido na INI-R (INMETRO, 2018).

3.1.4. Identificação das unidades habitacionais

Os domicílios foram identificados através de números inteiros, que seguem a ordem crescente, do pavimento térreo para a cobertura, de forma que as quatro primeiras UH correspondem ao andar térreo e as quatro últimas correspondem à cobertura, como sugere a Tabela 3.

	Altura do pav. (m)	Número da UH			
		SO	SE	NE	NO
Cobertura	7,5	13	14	15	16
Intermediário	5	9	10	11	12
Intermediário	2,5	5	6	7	8
Térreo	0	1	2	3	4

Tabela 3 – Enumeração das UH por pavimento e por fachada.

O número das UH, dentro de um mesmo pavimento cresce na medida em que a direção da fachada vai do Sudoeste para o Noroeste, no sentido anti-horário. A Figura 4 ilustra a direção de exposição das fachadas de acordo com a enumeração das UH.

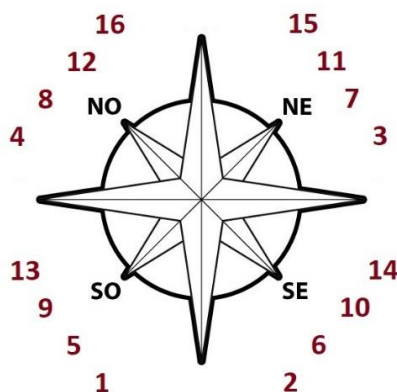


Figura 4 – Rosa dos ventos com a identificação das UH.

3.2. MÉTODO SIMPLIFICADO

Para aplicar o método simplificado da INI-R certos parâmetros construtivos devem ser respeitados (INMETRO, 2018). Como consta na Tabela 4, a tipologia padrão em análise, representada pelos casos extrapolados, não respeitou os limites para a transmitância térmica do piso e das paredes externas, capacidade térmica do piso externo e fator de ventilação.

	Limites para o Método Simplificado	Parâmetros da edificação (extrapolados)	Parâmetros da edificação (ajustados)
Absortância solar da cobertura	0,30 a 0,80	0,7	0,7
Absortância solar das paredes externas	0,30 a 0,80	0,6	0,6
Altura do pavimento em relação ao solo (m)	0 a 50	0 a 7,5	0 a 7,5
Área da fachada (m ²)	0 a 150	0 a 7,63	0 a 7,63
Área do ambiente (m ²)	8 a 300	8,57 a 23,26	8,57 a 23,26
Capacidade térmica da cobertura (kJ/m ² K)	20 a 250	233	233
Capacidade térmica das paredes externas (kJ/m ² K)	30 a 290	240	240
Capacidade térmica do piso externo (kJ/m ² K)	50 a 200	243,8 Alta inércia térmica	200 Alta inércia térmica
Fachadas expostas a ambientes externos	Salas: 1 ou 2 Dormitórios: 1, 2 ou 3	Salas: 2 Dormitórios: 2	Salas: 2 Dormitórios: 2
Fator de abertura para ventilação	0,5 a 1,0	0,407 a 0,45	0,5
Fator solar do vidro	0,22 a 0,87	0,87	0,87
Pé-direito (m)	2,50 a 5,00	2,50	2,50
Proporção de área de fachada em relação a área do piso	0 a 1,50	0,177 a 0,890	0,177 a 0,890
Percentual de vidro na fachada (%)	0,10 a 0,90	0,195 a 0,388	0,195 a 0,388
Tamanho de projeção horizontal da sacada ou marquise (m)	0 a 2	0	0
Transmitância térmica da cobertura (W/m ² K)	0,50 a 3,50	2,06	2,06
Transmitância térmica das paredes externas (W/m ² K)	0,50 a 3,65	4,40	3,65
Transmitância térmica do piso externo (W/m ² K)	2,00 a 3,00	4,20	3,00
Transmitância térmica do vidro (W/m ² K)	2,80 a 5,70	5,70	5,70

Tabela 4 – Limites de aplicação do método simplificado da INI-R.

Visando analisar o desempenho térmico do padrão construtivo do programa MCMV através do método simplificado, duas abordagens foram realizadas:

1. Foram utilizados os valores reais encontrados na tipologia base, assim, extrapolou-se os valores do método simplificado – situação extrapolada;
2. Foram ajustados os valores reais para os limites do método simplificado – situação ajustada.

Os ajustes das características térmicas para que a tipologia se enquadrasse no método simplificado foram escolhidos de maneira a modificar o mínimo possível a tipologia dos casos base, como expõe a Tabela 4. Portanto, as características que ultrapassaram os limites de aplicação do método, nos casos extrapolados, tiveram os valores iguais aos limites, nos casos ajustados.

A capacidade e a transmitância térmica do piso externo são inseridas no metamodelo através de um único parâmetro de entrada, onde o usuário define se o piso tem alta ou baixa inércia térmica. Sendo assim, apesar da alteração do valor da capacidade térmica do piso de 243,8 para 200 kJ/m²K e da transmitância térmica do piso de 4,20 para 3,00 W/m²K, o piso se mantém com alta inércia térmica, logo, não traz consequências para o resultado classificação da eficiência energética. Na condição ajustada, o valor do fator de ventilação foi alterado para o valor mínimo (0,5) em todos os ambientes, enquanto a transmitância térmica varia de 4,40 para 3,65 W/m²K.

É importante ressaltar que ambas as abordagens realizadas não são aconselhadas, já que a INI-R define claramente os limites de aplicação dos métodos. Quando os limites da Tabela 4 não são respeitados, a INI-R indica que se deve aplicar o método de simulação apenas para a análise da envoltória, enquanto o sistema de aquecimento de água se mantém classificado através do método simplificado. Entretanto, como a nova proposta do regulamento entrará em consulta pública no próximo ano, análises como estas são importantes para testar os limites de aplicação do método simplificado e entender os desvios de comportamento das edificações quando o metamodelo é levado para além dos casos vistos pela rede neural. Vale lembrar, ainda, que os resultados encontrados não serão tão acurados quanto o modelo de simulação.

3.2.1. Envoltória

Para a determinação do nível de eficiência energética da envoltória, inicialmente, estimou-se a carga térmica da edificação para a condição real e de referência. A INI-R

indica que as predições podem ser realizados através do modelo preditivo disponível no endereço <http://pbeedifica.com.br/redes/residencial/> (INMETRO, 2018). Como citado anteriormente, optou-se por realizar esse procedimento utilizando a linguagem R.

O metamodelo da plataforma virtual é uma rede neural *online* onde o usuário insere os dados de entrada necessários para a predição da carga térmica e do percentual de horas em conforto térmico (PHOC_T). Os valores de saída relativos à carga térmica predita pelo metamodelo encontram-se em kWh/(m²ano). O PHOC_T quando a unidade habitacional (UH) é ventilada naturalmente é um dado de saída meramente informativo, já que não é utilizado para o cálculo da classe de eficiência energética da UH, e não será abordado nesse trabalho.

Como indicado no início do método (item 3 deste texto), a rede neural foi aplicada através da linguagem de programação R, assim, os parâmetros de entrada necessários para a predição das cargas térmicas de aquecimento e resfriamento foram os mesmos necessários para o funcionamento do metamodelo virtual. Para inserir os parâmetros de entrada, foram utilizadas planilhas de Excel no formato “*comma-separated values*” (“.csv”) que viabilizam a leitura dos parâmetros de entrada através da linguagem. O código desenvolvido na linguagem de programação utiliza-se de vetores para salvar automaticamente os parâmetros de saída calculados pela rede neural, logo, cada valor dos vetores diz respeito a um dos parâmetros de saída de cada APP. Dessa maneira, o código utilizou-se dos valores preditos pela rede neural para dar continuidade aos cálculos e chegar ao nível de eficiência energética da envoltória.

	TMA (°C)	dpT (°C)	AMA (°C)	dpA (°C)
São Paulo (SP)	21,13	1,84	6,56	0,65
Cuiabá (MT)	27,92	1,56	8,73	1,18
Salvador (BA)	26,89	1,28	4,43	0,99
Manaus (AM)	28,47	0,81	5,60	0,82

Tabela 5 – Valores das variáveis climáticas independentes para as quatro cidades em análise, necessárias para o funcionamento do metamodelo.

Além dos dados construtivos e das propriedades térmicas fornecidas, a rede neural exige, ainda, que se identifique a cidade, o grupo climático (GCL) na qual a edificação está inserida. A rede associa a cidade com valores de temperatura média anual (TMA) e desvio padrão da temperatura média (dpT) e amplitude média anual (AMA) e desvio

padrão da amplitude (dpA) (as informações climáticas estão disponíveis no banco de dados do sítio onde se encontra metamodelo). Essas quatro variáveis climáticas foram utilizadas, então, como parâmetros de entrada nas previsões das cargas térmicas através do metamodelo. É importante frisar que a condição de referência deve se situar na mesma localização da condição real.

Como as cidades de São Paulo, Cuiabá, Salvador e Manaus representaram as regiões onde há maior quantidade de registros da tipologia do caso base, foi necessário adotar valores para a TMA, o dpT, a AMA e o dpA, como consta na tabela 5, para que a rede neural pudesse prever as cargas térmicas nesses climas.

Realizada a previsão das cargas térmicas de resfriamento e aquecimento de cada APP, mas condições real e de referência, através do metamodelo acoplado ao código em R, por exigências da instrução normativa (INI-R), foi necessário realizar ajustes nas cargas térmicas, sendo que, para as cargas térmicas da condição real e da condição de referência que resultaram em valores menores que 1, adotou-se o valor 1. Realizado o ajuste, comparou-se os valores das cargas térmicas para as duas condições para se obter o percentual de redução de carga térmica entre elas, da seguinte maneira.

Percentual de redução da carga térmica para resfriamento:

$$\%RedCgTR = [(CgTR_{APP,ref} - CgTR_{APP,real}) / (CgTR_{APP,ref})] \cdot 100 \rightarrow \text{adimensional.}$$

Onde:

$\%RedCgTR$ = percentual de redução da carga térmica de resfriamento.

$CgTR_{APP,ref}$ = carga térmica de resfriamento do APP na condição de referência.

$CgTR_{APP,real}$ = carga térmica de resfriamento do APP na condição real.

Percentual de redução da carga térmica para aquecimento:

$$\%RedCgTA = [(CgTA_{APP,ref} - CgTA_{APP,real}) / (CgTA_{APP,ref})] \cdot 100 \rightarrow \text{adimensional.}$$

Onde:

$\%RedCgTA$ = percentual de redução da carga térmica de aquecimento.

$CgTA_{APP,ref}$ = carga térmica de aquecimento do APP na condição de referência

$CgTA_{APP,real}$ = carga térmica de aquecimento do APP na condição real

Com o conhecimento do GCL, o tipo de APP (sala ou dormitório) e a área do piso do APP, estipulou-se os limites inferiores das classes de eficiência energética “A”, “B” e

“C” dos APP para aquecimento e resfriamento, através das Tabelas B.1 e B.2 do texto principal da INI-R (INMETRO, 2018). Os limites inferiores atrelados a redução de carga térmica resultaram nos equivalentes numéricos para aquecimento e resfriamento de cada APP. As equações, que seguem, para o cálculo do equivalente numérico, servem tanto para a redução da carga térmica de aquecimento, quanto para a redução da carga térmica de resfriamento.

Quando $\%RedCgT(A/R) \geq LimInf A$:

$$EqNum_{APP} = 3 + ((\%RedCgT(A/R) - LimInfA) / (100 - LimInfA)) \rightarrow \text{adimensional.}$$

Quando $LimInf B \leq \%RedCgT(A/R) < LimInf A$:

$$EqNum_{APP} = 2 + ((\%RedCgT(A/R) - LimInfB) / (LimInfA - LimInfB)) \rightarrow \text{adimensional.}$$

Quando $LimInf C \leq \%RedCgT(A/R) < LimInf B$:

$$EqNum_{APP} = 1 + (\%RedCgT(A/R) / LimInfB) \rightarrow \text{adimensional.}$$

Quando $\%RedCgT(A/R) < LimInf C$:

$$EqNum_{APP} = 0 \rightarrow \text{adimensional.}$$

Onde:

$EqNum_{APP}$ = equivalente numérico do APP.

$\%RedCgT(A/R)$ = percentual de redução da carga térmica de aquecimento ou de resfriamento.

$LimInfA$ = limite inferior para a classe de eficiência energética A.

$LimInfB$ = limite inferior para a classe de eficiência energética B.

$LimInfC$ = limite inferior para a classe de eficiência energética C.

Com os valores do percentual de redução de cargas térmicas para refrigeração e aquecimento e com seus respectivos limites inferiores calculados, encontrou-se o equivalente numérico de refrigeração e de aquecimento de cada APP. É importante observar que o limites inferiores e equivalentes numéricos para a carga térmica de aquecimento só foram calculados para os GCL de 1 a 8 (incluindo 1-A e 1-B), como

estipula o regulamento. Vale ressaltar também, que, para cargas térmicas da condição real ou da condição de referência com valores menores que 1, tanto para aquecimento quanto para resfriamento, o equivalente numérico do APP é ajustado para 3.

De maneira lógica, ponderou-se o equivalente numérico dos APP pelas suas respectivas áreas para se encontrar o equivalente numérico de aquecimento e resfriamento da envoltória da UH. Finalmente, foi calculado o equivalente numérico global para a envoltória, realizando-se a ponderação dos equivalentes numéricos de aquecimento e resfriamento pelas respectivas cargas térmicas totais da UH, encontrando-se, então, um único equivalente numérico para envoltória de cada UH, correspondendo à soma ponderada dos efeitos de aquecimento e resfriamento.

O equivalente numérico da envoltória definiu a classe de eficiência energética da envoltória das UH de acordo com os limites da tabela que segue, extraída da INI-R (INMETRO, 2018).

A	B	C	D
$\text{EqNumUH} \geq 3$	$3 > \text{EqNumUH} \geq 2$	$2 > \text{EqNumUH} \geq 1$	$\text{EqNumUH} < 1$

Tabela 6 – Escala de classificação da envoltória da UH, extraída da INI-R. Fonte: INMETRO (2018).

A fim de encontrar o consumo energético da UH na condição real e de referência, foram realizadas uma série de cálculos, já que as cargas térmicas previstas inicialmente no metamodelo resultaram em valores dependentes da área do APP (kWh/m²ano).

Assim sendo, primeiramente, calculou-se a carga térmica da UH somando-se a multiplicação da carga térmica de cada APP da UH, obtida através da rede neural, pela área do APP. Este cálculo foi repetido para as cargas térmicas de aquecimento e resfriamento de cada UH, assim, obtiveram-se resultados em kWh/ano para a refrigeração e para o aquecimento das UH na condição real e de referência. Dividiu-se, então, os valores das cargas térmicas pelo coeficiente de performance (COP) do sistema de condicionamento de ar e encontrou-se o valor do consumo energético para aquecimento e resfriamento das UH na condição real e de referência. De acordo com a INI-R o COP utilizado deve ser sempre 3,24 (INMETRO, 2018). Somaram-se os valores de aquecimento e resfriamento e encontrou-se o consumo de energia elétrica para a condição

real e de referência que, multiplicado pelo fator de conversão de energia elétrica (1,6), resultou no consumo final de energia primária da envoltória das UH.

Os valores do consumo energético da envoltória são expostos na etiqueta da INI-R a título informativo. Apesar de não servir para a classificação da eficiência energética da envoltória, o cálculo do consumo de energia primária das condições real e de referência foi realizado, pois, posteriormente, o resultado foi utilizado para a classificação final do nível de eficiência energética geral das UH, levando-se em consideração a eficiência do sistema da envoltória combinado com o sistema de aquecimento de água.

3.2.2. Aquecimento de água

O primeiro passo para o cálculo da classe de eficiência energética do sistema de aquecimento de água foi conferir os quatro pré-requisitos iniciais que, quando desrespeitados, impõem que esse sistema poderá atingir no máximo classe “B” de eficiência energética. Como a edificação real em análise (caso base) não possui sistema de recirculação, reservatório de água quente e múltiplos aquecedores, todos os pré-requisitos foram respeitados, sendo assim, o sistema de aquecimento de água para essa edificação, inicialmente, esteve apto a alcançar o nível “A” de eficiência energética.

Em seguida, calculou-se o volume diário de consumo de água quente da UH multiplicando-se o volume diário de água quente por pessoa pelo número de pessoas que habitam a UH. Como indica a INI-R, considerou-se 2 pessoas por dormitório e 50 litros/pessoa/dia, para todas as UH da edificação em análise, totalizando 4 pessoas por UH, já que são 2 dormitórios por UH.

Com o volume diário de consumo de água quente da UH, calculou-se a energia consumida no atendimento da demanda de água quente (E_{AA}), como segue.

Energia consumida no atendimento da demanda de água quente:

$$E_{AA} = 1,162 \cdot V_{\text{dia}} \cdot (\theta_{A,\text{uso}} - \theta_{A,0}) \rightarrow \text{kWh/dia.}$$

Para as regiões Norte e Nordeste, a temperatura de uso ($\theta_{A,\text{uso}}$ [°C]) vale 38°C, para as demais regiões a $\theta_{A,\text{uso}}$ vale 40°C. A temperatura de água fria ($\theta_{A,0}$ [°C]) é a média anual da temperatura ambiente da cidade onde está localizada a edificação subtraída de 2°C. A média anual da temperatura de diversas cidades pode ser encontrada no sítio do

Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E), <http://cb3e.ufsc.br/etiquetagem/desenvolvimento/atividades-2012-2016/trabalho-1/pesquisas>. As temperaturas de uso e de água fria para as quatro cidades analisadas encontram-se na Tabela 7.

	$\theta_{A,uso} (^{\circ}C)$	$\theta_{A,0} (^{\circ}C)$
São Paulo (SP)	40	17,6
Cuiabá (MT)	40	24,3
Salvador (BA)	38	23,9
Manaus (AM)	38	25,3

Tabela 7 – Temperatura de uso ($\theta_{A,uso} [^{\circ}C]$) e temperatura de água fria ($\theta_{A,0} [^{\circ}C]$) para as quatro cidades analisadas.

Como o sistema de aquecimento de água do caso base é individual considerou-se que as perdas térmicas na tubulação do sistema de distribuição não são significativas ($E_{AA,per,tub} = 0$). Já que não há sistema de recirculação e não há reservatório, não houveram perdas na recirculação ($E_{AA,per,rec} = 0$) ou no reservatório ($E_{AA,res} = 0$). Além disso, não há recuperador de calor ou aquecedor solar, logo, $E_{AA,rec,sol} = 0$. Assim, a equação do consumo anual de energia térmica para o aquecimento de água foi resumida da maneira que segue.

Consumo anual de energia térmica para o aquecimento de água:

$$C_{AA,t} = 365 \cdot (E_{AA} - E_{AA,rec,sol} + E_{AA,per,tub} + E_{AA,per,rec} + E_{AA,res}) / r_{aq} \rightarrow \text{kWh/ano.}$$

Consumo anual de energia térmica para o aquecimento de água para a edificação em análise:

$$C_{AA,t} = 365 \cdot (E_{AA} / r_{aq}) \rightarrow \text{kWh/ano.}$$

Onde:

$C_{AA,t}$ = consumo anual de energia térmica para o aquecimento de água.

E_{AA} = energia consumida no atendimento da demanda de água quente.

$E_{AA,rec,sol}$ = energia para aquecimento de água proveniente de sistemas que recuperam calor ou energia solar térmica.

$E_{AA,per,tub}$ = energia para suprir perdas térmicas de distribuição.

$E_{AA,per,rec}$ = energia consumida para suprir perdas térmicas de sistemas de recirculação.

$E_{AA,res}$ = energia consumida para suprir perdas térmicas em reservatórios.

r_{aq} = rendimento do aquecedor de água térmico.

Multiplicando-se o consumo anual de energia térmica com aquecimento de água pelo fator de conversão de energia térmica em energia primária (1,1), encontrou-se o consumo anual de energia primária para o aquecimento de água.

As fórmulas para o consumo de energia primária das UH na condição real e de referência são similares, porém, para a condição de referência foi utilizado chuveiro elétrico com eficiência de 95%, desconsiderando-se perdas na tubulação, como sugere a instrução normativa. Para transformar o consumo de energia elétrica em energia primária utilizou-se o fator de conversão de energia elétrica em energia primária (1,6), como exige o regulamento.

Sistemas	Classes de eficiência energética				
	A	B	C	D	E
Com armazenamento	$E \geq 30\%$	$E \geq 20\%$	$E \geq 10\%$	$E \geq 0\%^*$	$E < 0\%$
Sem armazenamento	$E \geq 21\%$	$E \geq 14\%$	$E \geq 7\%$	$E \geq 0\%^*$	$E < 0\%$

Tabela 8 – Escala de classificação do sistema de aquecimento de água da UH. Fonte: INMETRO (INMETRO, 2018).

Para chegar ao nível de eficiência energética do sistema de aquecimento de água comparou-se o consumo de energia primária da condição real com a referência e, de acordo com a economia do sistema real, definiu-se a sua classe de eficiência energética, como indica a Tabela 8.

3.2.3. Classificação geral da unidade habitacional

Para quantificar o consumo total de energia elétrica foi necessário, ainda, calcular o consumo médio estimado de equipamentos, definido na INI-R como o número de habitantes da UH multiplicado pelo consumo médio por pessoa de 28,37 kWh/mês. Como todos os consumos calculados no método simplificado são anuais, nessa etapa foi preciso

multiplicar o valor encontrado por 12 meses, resultando no consumo médio estimado de equipamentos anual.

Somando-se o consumo de energia primária do sistema da envoltória e do sistema de aquecimento de água com o consumo elétrico dos equipamentos convertido em energia primária (multiplicado por 1,6), obteve-se o consumo total de energia primária da edificação. Esse cálculo foi realizado para a condição real e para a condição de referência.

Similar à classificação do sistema de aquecimento de água, para a classificação final da UH comparou-se o consumo total de energia primária da condição real com a condição de referência, encontrando a redução do consumo de energia primária. Sabendo-se o número de dormitórios e o grupo climático de cada UH, obtiveram-se os limites inferiores de redução do consumo de energia primária para as classes de eficiência energética “A”, “B” e “C”. Os valores dos limites inferiores encontram-se nas Tabelas 4 e 5 do texto principal da INI-R (INMETRO, 2018).

Para redução do consumo de energia primária maior que o limite inferior “A”, a UH recebeu conceito “A”; para redução com valor entre os limites “A” e “B”, a UH foi classificada com a classe “B” de eficiência energética; para redução de consumo da UH com valor entre os limites “B” e “C”, a mesma obteve classificação “C”; para qualquer valor onde a redução foi menor que 0, a UH foi classificada com a classe de eficiência “E”, a classe de menor eficiência.

Após realizados todos os cálculos referentes aos consumos de energia da edificação, foi possível calcular a emissão de dióxido de carbono total da edificação através do Anexo F do regulamento. Para tanto, foi preciso seguir a seguinte equação, onde C_{EE} e C_{ET} referem-se ao consumo total de energia elétrica e térmica, respectivamente, e fe_e e fe_t correspondem aos fatores de emissão de dióxido de carbono na geração de energia elétrica e térmica, respectivamente.

Emissão total de dióxido de carbono da edificação:

$$E_{CO2} = (C_{EE} \cdot fe_e + C_{ET} \cdot fe_t) / 1000 \rightarrow tCO_2/\text{ano}.$$

O valor do fator de emissão de dióxido de carbono para a geração de energia térmica foi retirado da Tabela 9, enquanto o fator de emissão de dióxido de carbono para a geração de energia elétrica foi retirado da Tabela 10. Ambas as tabelas se encontram no Anexo F da INI-R (INMETRO, 2018).

Combustível	Fatores de Emissão de CO ₂ por Queima de Combustível	Unidade
Gás natural	0,202	kg.CO ₂ /kWh

Tabela 9 – Seção da Tabela F.1 da INI-R, que refere-se ao fator de emissão de dióxido de carbono por queima de combustível.

Geração de eletricidade	Fatores de Emissão de Dióxido de Carbono por Geração de Eletricidade	Unidade
SIN – Sistema Interligado Nacional	0,09	kg.CO ₂ /kWh

Tabela 10 – Tabela F.2 da INI-R, que se refere ao fator de emissão de dióxido de carbono por geração de elétrica.

É importante ressaltar que, assim como o Anexo E, o Anexo F também corresponde a uma etapa informativa do regulamento.

3.4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE GLOBAL

3.4.1. Análise de sensibilidade de Sobol

Silva e Ghisi (2013) discutiram sucintamente sobre a aplicabilidade da análise de sensibilidade global em regulamentações de eficiência energética, como o RTQ-R, e afirmaram que o método é de grande valor para o caso. De acordo com Tian (2013), o método de Sobol é o mais completo, porém, é computacionalmente mais custoso que outros métodos de análise de sensibilidade global, como o método FAST (*Fourier Amplitude Sensitivity Test*).

O metamodelo utilizado na INI-R para a predição das cargas térmicas utiliza 28 parâmetros de entrada, somados às 4 variáveis climáticas, totalizam 32 parâmetros. Esses parâmetros possuem relações não-lineares e de dependência entre si, assim, realizar análises de ordens superiores é uma alternativa interessante para entender a importância real de cada variável na classificação de eficiência energética. Como a análise desse trabalho foi aplicada em predições que exigem baixos esforços computacionais, as exigências computacionais não foram um fator limitante, logo, o método de Sobol foi o escolhido.

Foi identificado nos resultados da classificação de eficiência energética através do método simplificado da INI-R (etapa descrita no item 3.2 desse texto) que os pavimentos

apresentaram padrões de comportamento diferentes em relação às cargas térmicas e às condições de exposição do piso e da cobertura. Esses resultados expuseram que a relação da carga térmica de aquecimento sobre a carga térmica de resfriamento é baixíssima, mesmo para cidades com clima mais seco e frio, como São Paulo. Essa relação revelou que a carga térmica de resfriamento é muito mais importante para o cálculo do consumo final de energia primária dos casos base. Portanto, para esse trabalho, optou-se por analisar a variação da carga térmica de resfriamento mediante a oscilações nos dados de entrada do metamodelo do método simplificado da INI-R.

Como os resultados do item 4.1.2 desse texto também demonstraram que as condições de exposição têm forte influência na predição da carga térmica através do método simplificado da instrução normativa, foi decidido variar as propriedades térmicas da edificação de acordo com a exposição da UH ao ambiente, dividindo a edificação em três grupos: pavimento térreo, pavimentos intermediários e pavimento de cobertura. Esses mesmos resultados, descritos no item 4.1.2, auxiliaram na escolha do parâmetro de saída que mais influencia no consumo de energia primária da envoltória, assim como na decisão sobre dividir o edifício em grupos de comportamentos térmicos semelhantes.

O método de análise de sensibilidade de Sobol diz respeito a variações contínuas dos parâmetros selecionados e exige que a amostra seja desenvolvida pelo método de amostragem de Sobol, de forma quase randômica. Portanto, foi estabelecido, para cada clima analisado (São Paulo, Cuiabá, Mato Grosso e Manaus), uma amostragem quase randômica de 24.000 casos para o pavimento de cobertura, 18.000 casos para os pavimentos intermediários e 18.000 casos para o pavimento térreo, através da biblioteca SALib, da linguagem de programação Python. Cada um dos casos corresponde a uma UH diferente para cada grupo analisado (cobertura, pavimentos intermediários e térreo), como evidencia a Tabela 11. A distribuição dos parâmetros foi ilustrada através de histogramas, expostos no Gráfico 1.

Variável	Intervalos		
	Cobertura	Intermediário	Térreo
Número de casos	24.000	18.000	18.000
Veneziana	Com; sem	Com; sem	Com; sem
Porcentagem envidraçada das fachadas	0,1 ~ 0,9	0,1 ~ 0,9	0,1 ~ 0,9
Transmitância térmica da cobertura (W/m^2K)	0,5 ~ 3,5	-----	-----
Capacidade térmica da cobertura	Leve; Média; Pesada	-----	-----
Absortância da cobertura	0,2 ~ 0,8	-----	-----
Transmitância térmica das paredes (W/m^2K)	0,5 ~ 3,5	0,5 ~ 3,5	0,5 ~ 3,5
Capacidade térmica das paredes	Leve; Média; Pesada	Leve; Média; Pesada	Leve; Média; Pesada
Absortância das paredes	0,2 ~ 0,8	0,2 ~ 0,8	0,2 ~ 0,8
Fator solar dos vidros	0,22 ~ 0,87	0,22 ~ 0,87	0,22 ~ 0,87
Fator de altura da abertura	0 ~ 1	0 ~ 1	0 ~ 1
Fator de ventilação	0,5 ~ 1	0,5 ~ 1	0,5 ~ 1

Tabela 11 – Intervalo de variação dos parâmetros de entrada quando aplicada a análise de sensibilidade de Sobol sobre a carga térmica de resfriamento.

O método simplificado da INI-R define que a transmitância térmica da cobertura e a absortância da cobertura devem ser iguais a zero e que a capacidade térmica da cobertura deve ser considerada pesada em todos os pavimentos que não possuem sua cobertura exposta. Sendo assim, na análise de sensibilidade dos pavimentos intermediários e térreos, que não possuem cobertura exposta, foram excluídos esses três parâmetros de entrada, já que assumem valores fixos.

Foram seguidos os passos de Saltelli (2000) para realizar a análise de sensibilidade, da maneira que segue:

- Foi escolhido o parâmetro de saída de interesse: carga térmica de resfriamento;
- Foram selecionadas as propriedades térmicas que podem influenciar no parâmetro de saída:
 - Pavimentos intermediários e térreo: uso ou não de veneziana, percentual de horas em conforto térmico, transmitância térmica das paredes, capacidade térmica das paredes, absortância das paredes, fator

solar dos vidros, fator de altura da abertura e fator de ventilação (8 parâmetros de entrada);

- Pavimento superior (cobertura): uso ou não de veneziana, percentual de horas em conforto térmico, transmitância térmica da cobertura, capacidade térmica da cobertura, absorvância da cobertura, transmitância térmica das paredes, capacidade térmica das paredes, absorvância das paredes, fator solar dos vidros, fator de altura da abertura e fator de ventilação (11 parâmetros de entrada);
- Foram elaboradas amostras quase aleatórias, através do método de Sobol, utilizando a biblioteca SALib, da linguagem de programação Python, para os pavimentos intermediários e térreo e para a cobertura, variando continuamente cada um dos parâmetros de entrada selecionados;
- Foi predita a carga térmica de resfriamento utilizando a rede neural na linguagem de programação R;
- Os resultados da rede neural foram exportados para o Python, onde a análise de sensibilidade de Sobol foi, finalmente, efetuada, através da biblioteca SALib;
- Foi encontrada e plotada a relação dos parâmetros de entrada com a carga térmica de resfriamento e realizada a análise dos resultados para que, posteriormente, pudessem ser calculadas as economias médias da carga térmica de resfriamento quando realizadas alterações discretas nos parâmetros de entrada, como sugere o próximo item desse texto.

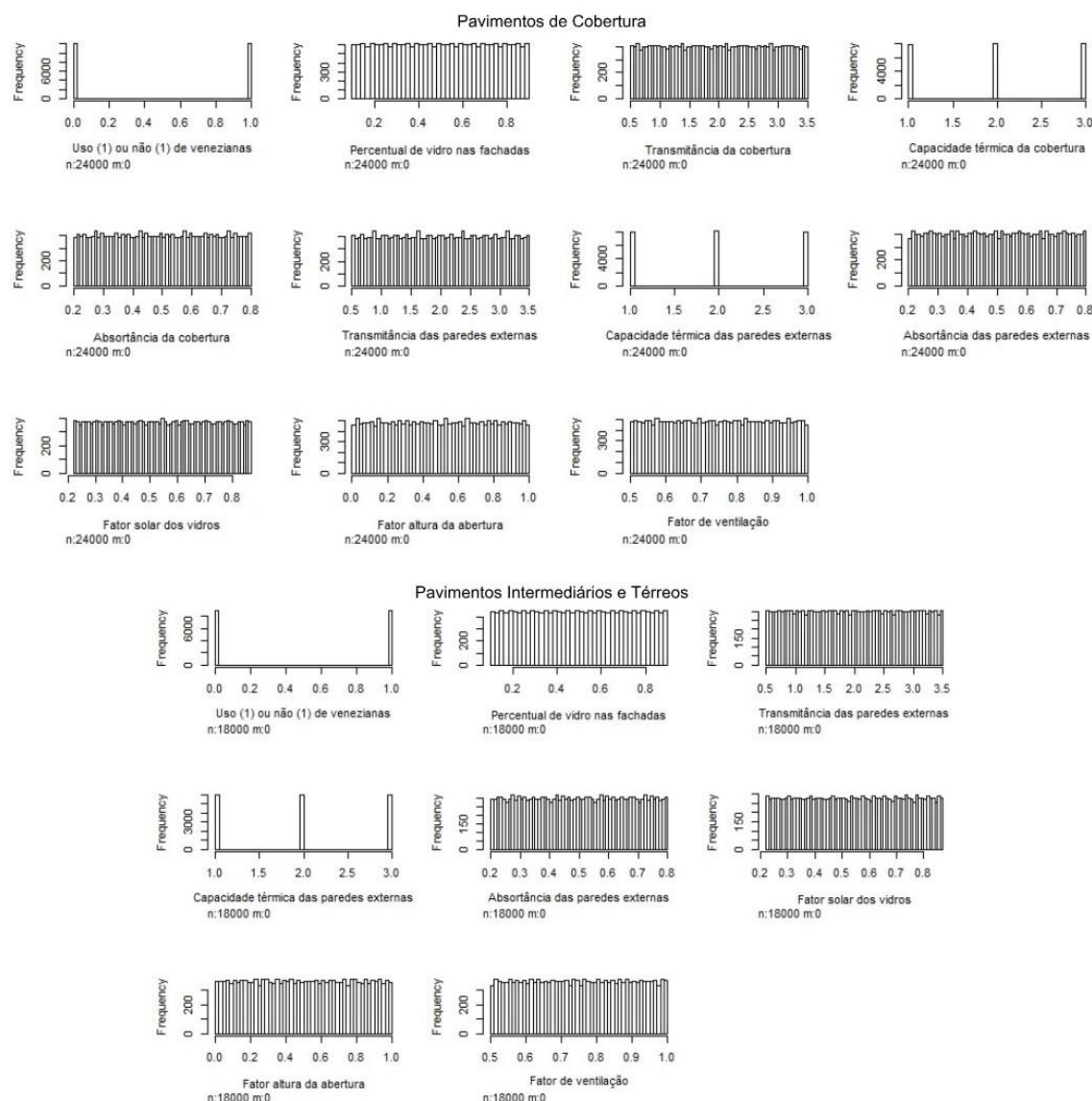


Gráfico 1 – Histogramas de distribuição dos parâmetros de entrada na amostragem.

O procedimento foi repetido para cada um dos quatro climas em estudo (São Paulo, Cuiabá, Salvador e Manaus).

3.4.2. Estimativa das economias de energia

Após realizadas as análises de sensibilidade para todos os climas e grupos de condições de exposição, foram identificados os parâmetros de entrada mais, e menos, influentes para a predição da carga térmica de resfriamento, e realizadas análises mais detalhadas sobre o seu comportamento, dentro do espaço amostral desenvolvido.

Para a análise detalhada foram fixados valores discretos para as variáveis com maior sensibilidade à carga térmica de resfriamento e plotados gráficos de caixas (*boxplots*), através da linguagem R, com valores estatísticos das cargas térmicas de cada valor discreto escolhido para os parâmetros de entrada. Todavia, como os valores utilizados no desenvolvimento da amostragem quase randômica, pelo método de Sobol, são contínuos, foi necessário assumir uma faixa de valores correspondente a cada valor discreto escolhido. Por exemplo: escolhido fixar a absorptância no valor de 0,4, foram selecionadas todas as UH com absorptância entre 0,39 e 0,41, a fim de que essas UH representassem os casos de absorptância de 0,4.

O estudo desse trabalho tratou-se da análise de milhares de casos, portanto, além dos *boxplots*, que fazem uso de conceitos estatísticos, foram desenvolvidas tabelas com estatísticas descritivas dos valores discretos extremos escolhidos. Para cada um dos valores discretos críticos das variáveis plotadas, foram descritos os valores mínimo e máximo da carga térmica correspondentes, os valores que delimitam o primeiro e o terceiro quartil correspondentes e os valores das médias e medianas correspondentes.

A partir da diferença entre as médias encontradas para os dois valores extremos da variável plotada, foi possível estimar as economias de energia provenientes da variação desses parâmetros de entrada, de um extremo ao outro. Assim, ficou esclarecido, em valores absolutos, apresentados em kWh/m²ano, o potencial de economia que se pode obter ao realizar variações nos parâmetros de entrada do metamodelo da INI-R, para os casos base.

4. RESULTADOS

Seguindo o proposto, essa seção apresenta, primeiramente, os resultados da aplicação da proposta do novo método simplificado do RTQ-R, a Instrução Normativa Residencial do INMETRO (INI-R) na edificação base do estudo, para o nível de renda 1 do programa “Minha Casa Minha Vida” (MCMV). Foram avaliadas as cargas térmicas de aquecimento e resfriamento, os consumos de energia elétrica, térmica e primária e as classes de eficiência energética. Em seguida, foi analisada a sensibilidade dos parâmetros de entrada para a previsão da carga térmica de resfriamento do método simplificado da INI-R, através do método de Sobol. Foram estimadas as economias de energia médias quando certos parâmetros de entrada (os mesmos parâmetros avaliados através da análise de sensibilidade global) sofreram alterações discretas.

4.1. MÉTODO SIMPLIFICADO

4.1.1. Caso extrapolado x ajustado

O método simplificado da INI-R foi aplicado para duas abordagens dos casos base, sugeridas no item 3.2 desse texto:

1. Casos extrapolados, que excedem os limites do método simplificado: foram utilizadas transmitância térmica das paredes externas de $4,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ e fator de ventilação 0,407 para as salas e 0,45 para os quartos;
2. Casos ajustados: foram utilizadas transmitância térmica das paredes externas de $3,65 \text{ W/m}^2\text{K}$ e fator de ventilação de 0,5, de acordo com os limites propostos na INI-R.

O Gráfico 2 se trata da plotagem da carga térmica de resfriamento para os casos extrapolados, no eixo “y”, sobre a carga térmica de resfriamento para os casos ajustados, no eixo “x”. A reta traçada no meio do gráfico diz respeito a função “ $y(x) = x$ ”, que foi usada apenas como uma referência. Portanto, os pontos que coincidissem com a reta indicariam que o valor da carga térmica encontrado para o caso extrapolado é igual ao valor da carga térmica para o respectivo caso ajustado.

Os resultados plotados no Gráfico 2 indicaram que os valores das cargas térmicas de resfriamento, encontrados para os casos ajustados, são inferiores aos encontrados para os casos extrapolados. Intuitivamente, esse era o resultado esperado, já que o fator de ventilação dos casos ajustados é maior. Logo, a ventilação natural, que, segundo a NBR 15220, é uma medida de eficiência energética passiva recomendada para maior parte dos climas brasileiros (ABNT, 2005), foi facilitada nos casos ajustados, assim, em todos os climas analisados, se obtiveram resultados de carga térmica superiores para os casos extrapolados. Enquanto o valor das cargas térmicas dos pavimentos térreos e intermediários foram os mais influenciados fator de ventilação, exceto no clima de São Paulo, a influência nos pavimentos de cobertura foi, relativamente, baixa.

Os casos extrapolados possuem paredes externas com absorvância alta (0,6) e capacidade térmica pesada, de modo que a alteração realizada na transmitância térmica das paredes externas não causou influências significativas nos valores da carga térmica para os pavimentos térreos. Já nos pavimentos intermediários e de cobertura, o valor da carga térmica teve um aumento considerável com a alteração da transmitância térmica das paredes externas.

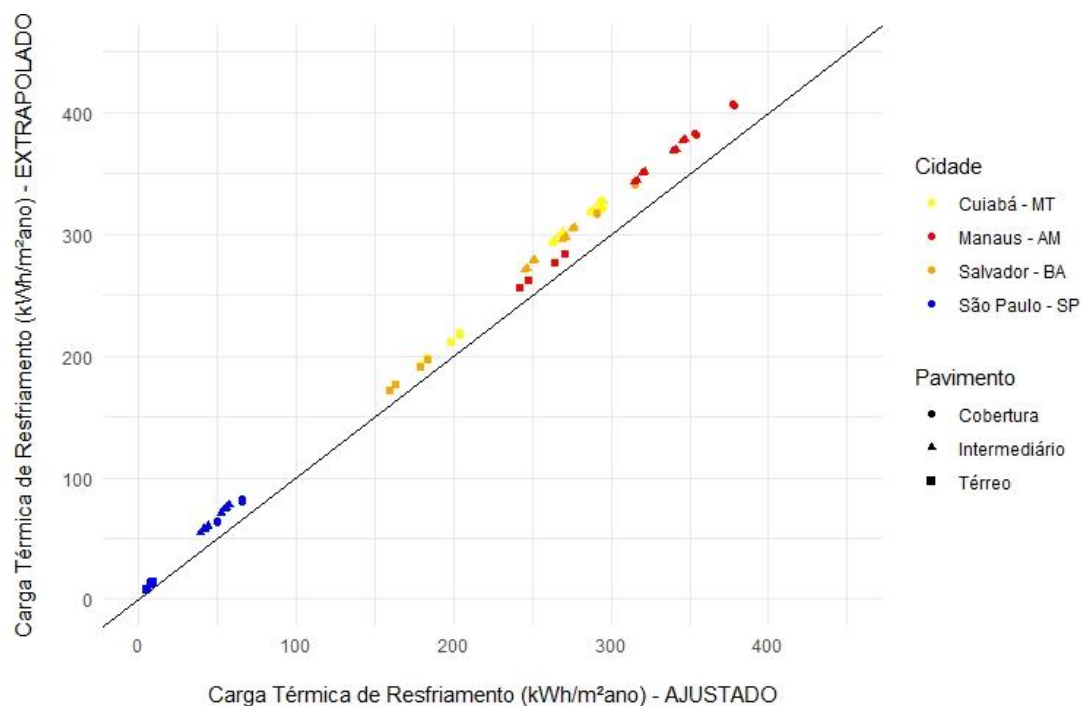


Gráfico 2 – Comparação das cargas térmicas de resfriamento dos casos extrapolado e ajustado.

As diferenças médias dos resultados da carga térmica de resfriamento entre os casos extrapolados e ajustados para os pavimentos térreo, intermediários e cobertura foram 10,4, 26,4 e 24,3 kWh/m²ano, respectivamente. Assim, notou-se que, para todos os climas analisados, os pavimentos térreos obtiveram menores diferenças de carga térmica entre os casos extrapolados e ajustados, quando comparados aos pavimentos intermediários e às coberturas.

Utilizando técnicas de regressão linear para entender o comportamento da distribuição dos pontos no Gráfico 2, encontrou-se a seguinte relação linear: “ $y = 1,06x + 9,17$ ”, onde o “y” representa os valores das cargas térmicas extrapoladas e “x” representa os valores das cargas térmicas ajustadas. O coeficiente de determinação (R^2) encontrado para essa função linear foi 0,998, ou seja, a regressão linear consegue explicar 99,8% dos valores observados. O erro quadrático médio encontrado foi de 5,31 kWh/m²ano.

Os resultados demonstraram que houve um padrão satisfatório na comparação entre as cargas térmicas dos casos extrapolados e ajustados, de modo que, utilizar os valores extrapolados para interpretar a eficiência energética do caso base é uma alternativa viável. Foi decidido, então, utilizar os valores reais das características térmicas, encontrados no trabalho de Triana (2016), para analisar a eficiência energética do caso base. Dessa forma, não há necessidade de realizar novas suposições para a aplicação do método simplificado para o caso em estudo.

4.1.2. Caso base

Inicialmente, foi plotado um gráfico de pontos onde a relação da carga térmica de aquecimento sobre a carga térmica de resfriamento representou o eixo das ordenadas e cada UH, enumerada de 1 a 16, representou o eixo das abcissas (Gráfico 3). Os quatro climas analisados (SP, MT, BA e AM) foram sobrepostos no mesmo gráfico e relacionados a cores diferentes. Os pontos das UH de 1 a 4 (pavimento térreo) para o clima da cidade de São Paulo foram suprimidos, pois apresentaram valores que, caso fossem plotados, dificultariam a visualização gráfica. As relações das cargas térmicas de aquecimento pelas cargas térmicas de resfriamento, para as UH de 1 a 4 de SP, obtiveram os valores de 0,11, 0,13, 0,08 e 0,07, respectivamente.

O Gráfico 3 explicitou que a importância da carga térmica de aquecimento foi muito menor que a importância da carga térmica de resfriamento, para os casos base, quando aplicada em qualquer uma das regiões brasileiras analisadas. Para os climas mais quentes e úmidos, como os estados do MT, BA e AM, os casos base obtiveram valores até 200 vezes maiores das cargas térmicas de resfriamento, quando comparadas com as cargas térmicas de aquecimento. Já para o caso base aplicado ao clima de SP, mais frio e seco, a importância da carga térmica de resfriamento superou a carga térmica de aquecimento com resultados de 7,7 a 76,9 vezes maior. Vale notar, ainda, que à medida que se analisou pavimentos em alturas menores (mais próximos do solo), como as UH de 1 a 4, a carga térmica de resfriamento da tipologia estudada tendeu a se tornar menos influente, porém, não chegou perto de igualar a influência da carga térmica de aquecimento.

A análise da relação exposta no Gráfico 3 sugeriu que, para os climas brasileiros analisados, principalmente para os climas quentes e úmidos, a carga térmica de resfriamento representou parte importante do consumo de energia das envoltórias das tipologias H do programa MCMV. Assim sendo, o consumo com refrigeração para essas tipologias deve ser monitorados atentamente.

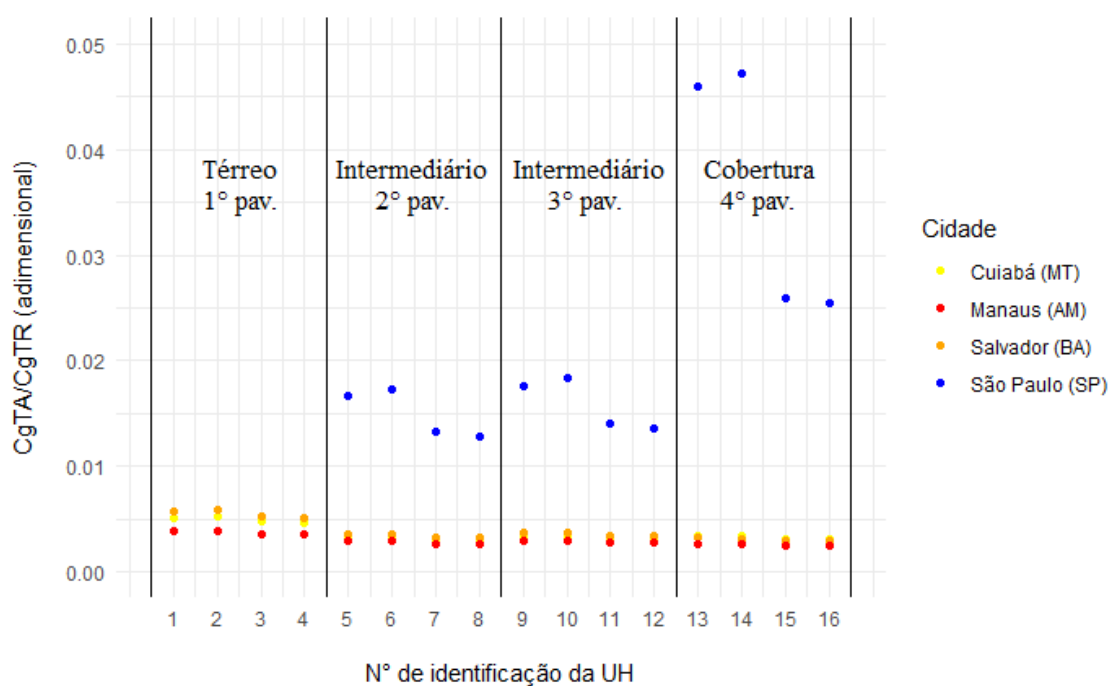


Gráfico 3 – Relação carga térmica de aquecimento sobre carga térmica de resfriamento da condição real, por UH.

De acordo com a Tabela 12, para todas as quatro regiões e para a tipologia estudada, foi notável que, para cada pavimento, o consumo de energia primária das UH foi muito influenciado pela orientação da fachada exposta. Para as UH pertencentes ao mesmo pavimento e com fachada exposta orientada para o sul (UH 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13 e 14), os valores do consumo de energia primária foram muito próximos, com variações máximas na faixa de 10 %, e, sempre, consideravelmente menores do que os consumos das UH de mesmo pavimento com fachada exposta orientada para o norte (UH 3, 4, 7, 8, 11, 12, 15 e 16). Analogamente, os valores dos consumos das UH de mesmo pavimento e com fachada norte exposta foram muito próximos, chegando no máximo a variações próximas de 10 % entre si.

No hemisfério sul do planeta, ambientes com fachada exposta ao norte recebem radiação solar ao longo de todo o ano. Por esse motivo, as UH da tipologia em análise orientadas para o norte demandaram mais energia, como sugerem os resultados do consumo de energia primária da Tabela 12. Devido à alta inércia térmica do solo, ambientes em contato com o solo têm maior facilidade de dissipar o calor interno, já ambientes de cobertura, por terem exposição zenital completa, recebem maior incidência solar e fluxo de calor. Os resultados do caso base expostos apontaram que as UH do térreo apresentam os menores consumos, enquanto as UH da cobertura possuem maiores consumos, como esperado.

N° UH	Fachada	São Paulo (SP) - GCL 1a			Cuiabá (MT) - GCL 24			Salvador (BA) - GCL 21			Manaus (AM) - GCL 18			
		CEP Real	EqNum	Classe	CEP Real	EqNum	Classe	CEP Real	EqNum	Classe	CEP Real	EqNum	Classe	
16	NO	1669.98	0.08	D	6507.05	0.57	D	6897.89	0	D	8208.29	0	D	Cobertura 4° pav.
15	NE	1705.61	0.08	D	6523.65	0.59	D	6927.09	0	D	8220.59	0.6	D	
14	SE	1351.33	0.66	D	6015.36	0.95	D	6433.49	0.81	D	7730.85	1.09	C	
13	SO	1328.48	0.72	D	6002.33	0.95	D	6408.04	0.81	D	7720.07	1.07	C	
12	NO	1506.29	0.61	D	6467.24	0.69	D	6027.1	0.63	D	7477.28	1.21	C	Intermed. 3° pav.
11	NE	1454.93	0.04	D	6432.52	0.6	D	5999.42	0	D	7447.56	1.12	C	
10	SE	1123.11	0.06	D	5920.99	0.62	D	5479.6	0	D	6933.7	0	D	
9	SO	1171.04	0.05	D	5959.04	0.71	D	5510.7	0.62	D	6966.56	0.69	D	
8	NO	1586.19	0.04	D	6630.39	0.64	D	6182.78	0.59	D	7637.36	1.17	C	Intermed. 2° pav.
7	NE	1535.55	0.04	D	6599.92	0	D	6159.81	0	D	7612.4	1.08	C	
6	SE	1188.14	0.05	D	6067.2	0	D	5621.72	0	D	7079.75	0	D	
5	SO	1235.68	0.05	D	6101.3	0.66	D	5648.48	0	D	7108.1	0.67	D	
4	NO	303.25	2.43	B	4407.85	1.09	C	3979.79	1.11	C	5742.37	2.24	B	Térreo 1° pav.
3	NE	274.58	2.42	B	4273.53	1.03	C	3869.4	1.04	C	5598.45	1.68	C	
2	SE	175.45	2.47	B	3878.94	1.04	C	3477.9	1.01	C	5167.98	1.72	C	
1	SO	196.17	2.99	B	4001.87	1.1	C	3577.96	1.08	C	5300.94	2.19	B	

Tabela 12 – Consumo de energia primária do sistema de envoltória para condição real e de referência.

De acordo com a Tabela 12, observou-se que o consumo de energia primária da tipologia em estudo aumentou das fachadas sul para as fachadas norte e dos pavimentos inferiores para os pavimentos superiores. O aumento do consumo, todavia, não se traduziu, necessariamente, em uma redução na classe de eficiência energética, pois a geometria e as condições de contorno e de exposição da edificação de referência são semelhantes à edificação real. Se o consumo de energia da edificação real aumenta com a exposição das fachadas ao norte, por exemplo, o consumo da edificação de referência aumenta de maneira similar, já que as fachadas expostas ao norte também se tornam mais expostas na referência. Dessa forma, se o consumo aumenta ao variar algumas dessas características na condição real, o consumo na condição de referência também aumenta, permitindo que a edificação, mesmo ao apresentar consumos maiores, atinja classes que representam maior eficiência energética.

Exposto o consumo de energia primária por UH, notou-se um tipo de padrão de crescimento no consumo de energia. Para identificar esse padrão, foi decidido plotar o Gráfico 4, onde cada ponto representa a carga térmica de resfriamento das UH da tipologia padrão para todas as regiões, já que foi reconhecida a importância da carga térmica de resfriamento no consumo de energia da edificação.

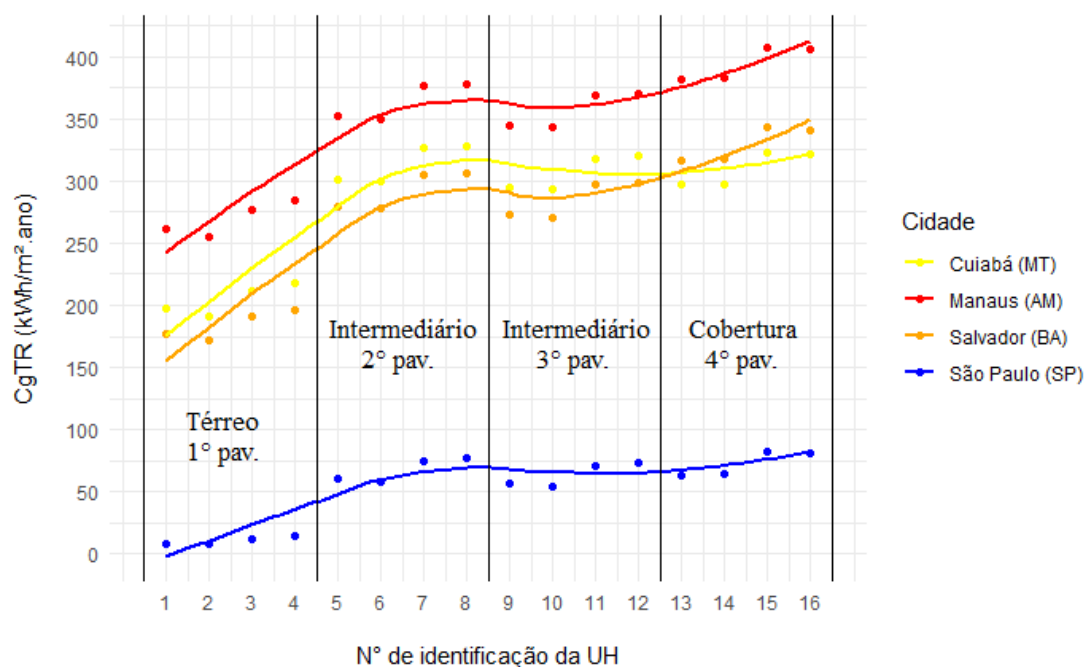


Gráfico 4 – Carga térmica de resfriamento da condição real por UH.

O Gráfico 4, referente às edificações do programa MCMV, revelou, então, que no pavimento térreo a carga térmica de resfriamento aumentou, consideravelmente, das UH com fachada sul exposta (UH 1 e 2) para as UH com fachada norte exposta (UH 3 e 4) e, significativamente, de 1,5 a 2 vezes, do pavimento térreo para os pavimentos intermediários. Nos pavimentos intermediários a carga térmica manteve o padrão comportamental do térreo, com valores maiores para as UH com exposição da fachada norte (UH 7, 8, 11 e 12), porém, os valores mantiveram-se no mesmo patamar, variando de 7 a 20 % entre si. O mesmo se repetiu para a cobertura, que, na média, obteve cargas térmicas maiores que os pavimentos inferiores e, novamente, o pavimento manteve a tendência, onde foram encontradas cargas térmicas maiores nas UH com fachadas expostas ao norte (UH 15 e 16).

Em todos os climas onde o caso base é aplicado, foi reconhecido um padrão de comportamento da carga térmica de resfriamento por pavimentos. Entre si, as UH do pavimento térreo revelaram cargas térmicas com valores próximos, assim como os pavimentos intermediários e a cobertura manifestaram o mesmo comportamento. Porém, para solidificar o padrão e utilizá-lo como base de análise das edificações através do método simplificado, optou-se por estudar a redução da carga térmica de resfriamento, já que a classe de eficiência energética não depende exclusivamente das cargas térmicas da condição real, mas também, de uma condição de referência pré-determinada.

Para realizar a análise foi traçado o Gráfico 5, um gráfico de barras da redução da carga térmica de resfriamento para cada UH da tipologia padrão do MCMV, que sustentou as observações realizadas até então. Esse gráfico detectou a diferença de comportamento entre os grupos de pavimentos, como constatado anteriormente. O pavimento térreo foi aquele que revelou maiores reduções de carga térmica de resfriamento, com destaque para o clima do estado de São Paulo, que obteve reduções cerca de duas vezes maiores que os outros estados, indicando níveis de eficiência energética maior. Reduções de carga térmica próximas de zero indicam que os níveis de eficiência energética dessas habitações estão no limite entre as classes “C” e “D”.

Os pavimentos intermediários evidenciaram reduções de carga térmica com valores positivos e negativos oscilando em torno de zero e, novamente, o clima do estado de São Paulo se destacou, com resultados expressivamente menores do que os outros. Para os pavimentos intermediários, o caso base aplicado ao clima frio e seco de SP respondeu com menor eficiência energética.

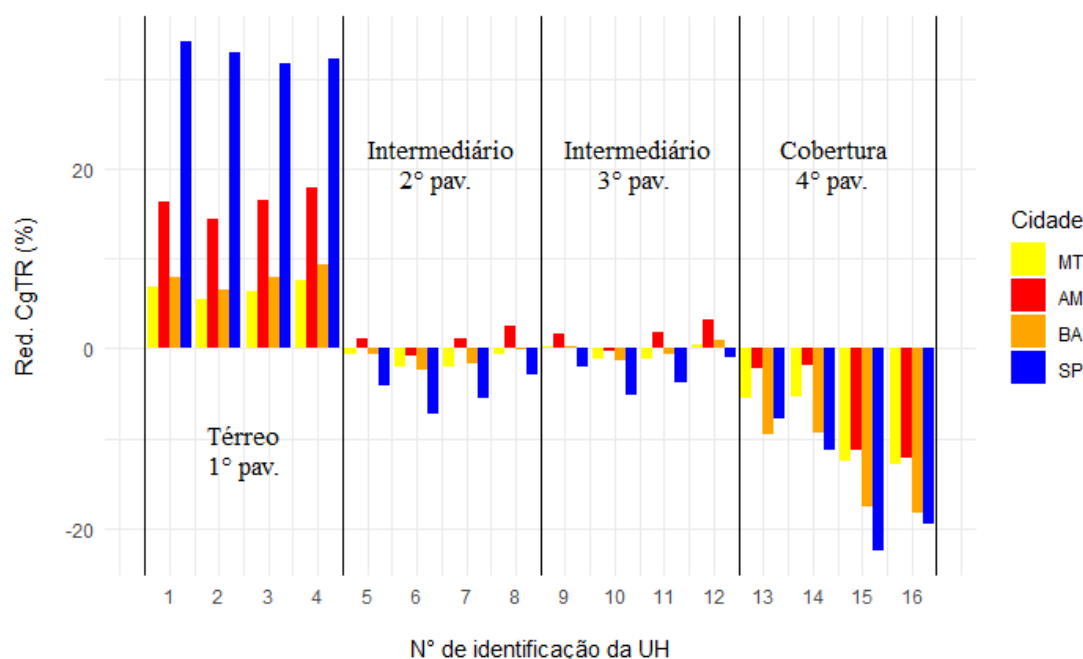


Gráfico 5 – Redução da carga térmica de resfriamento da condição real por UH.

A cobertura demonstrou aumentos na carga térmica de resfriamento da condição de referência para a condição real (reduções negativas), fato que indicou que as UH são menos eficientes que a condição de referência e, por isso, todas apresentaram classe de eficiência energética “D”. Notou-se que, nesses pavimentos, as reduções de carga térmica foram maiores na fachada norte. Os climas dos estados de São Paulo e Bahia apresentaram reduções muito próximas. Na fachada sul, o clima do estado Amazonas denotou reduções excessivamente baixas, resultado que indicou que os pavimentos da cobertura da tipologia padrão, quando aplicados a esse clima, são mais eficientes.

Os resultados expostos para os casos base mostraram que as diferentes exposições ao ambiente fizeram com que o padrão de comportamento térmico do pavimento térreo (piso exposto ao solo e cobertura não exposta, UH de 1 a 4) fossem diferentes dos pavimentos intermediários (piso e cobertura não expostos, UH de 5 a 12) e do pavimento de cobertura (piso não exposto e cobertura exposta, UH de 13 a 16). As características de exposição do piso e da cobertura interferiram totalmente no cálculo da carga térmica dos casos base através do método simplificado da instrução normativa. Foi reconhecido, portanto, que o comportamento dessa tipologia varia do pavimento térreo, para os pavimentos intermediários e, por fim, para a cobertura, de acordo com as condições de exposição do piso e da cobertura.

Com base nos resultados, optou-se em proceder às análises de sensibilidade seccionando a edificação nos três grupos de diferentes exposições identificados, tendo em vista que a carga térmica (parâmetro de saída) variou entre os grupos e, para que a carga térmica tenha variado, os parâmetros de entrada envolvidos também devem ter variado.

O sistema de aquecimento de água para todas as UH, em qualquer um dos climas analisados, recebeu classificação de eficiência energética “A”, pois houve uma redução de 22,25% no consumo de energia com aquecimento de água, da condição referência para a condição de real, em todos os casos, como expôs a Tabela 13. Como descrito anteriormente, o limite entre classes “A” e “B” para os sistemas de distribuição de água quente, sem armazenamento, equivale a 21% de redução de consumo, logo, para reduções maiores que 21%, o sistema é classificado como “A”, o mais eficiente. Ficou justificada, então, a classificação para o sistema de aquecimento de água do caso base.

São Paulo (SP)		Cuiabá (MT)		Salvador (BA)		Manaus (AM)		% Red AA	Classe
CAAP Real	CAAP Ref	CAAP Real	CAAP Ref	CAAP Real	CAAP Ref	CAAP Real	CAAP Ref		
2488.23	3200.17	1743.98	2242.98	1566.25	2014.39	1410.74	1814.38	22.25	A

Tabela 13 – Consumo de energia primária com de aquecimento de água.

Ressalta-se, ainda, que a INI-R exige que deve ser utilizado chuveiro elétrico com rendimento de 95% para a condição de referência dos sistemas de aquecimento de água individuais, portanto, o aquecedor de passagem a gás natural com eficiência de 84%, utilizado nos casos base, foi suficiente para atingir a classe mais eficaz de eficiência energética. Observou-se, ainda, que o consumo do sistema de aquecimento de água representa parte considerável do consumo total das edificações, principalmente para o clima de São Paulo.

Além da análise dos dois sistemas, o método simplificado da INI-R se preocupa, ainda, em calcular certos indicadores de sustentabilidade com intuito informativo, como a emissão de gás carbônico na atmosfera, que também foi explorada.

A última etapa da aplicação do método simplificado foi a avaliação conjunta dos dois sistemas (envoltória e aquecimento de água). Os resultados obtidos para os casos base nessa etapa, expostos na Tabela 14, se referem à emissão de gás carbônico (tCO₂/ano), consumo de energia primária (kWh/ano), redução do consumo de energia

primária (%) e classe de eficiência energética para as condições real e de referência em todos os climas de aplicação do caso base.

Observou-se que, na maioria das situações, a classe de eficiência energética “A” do sistema de aquecimento de água, quando adicionado ao sistema da envoltória, trouxe benefícios para a classificação final, tornando as habitações mais eficiente. Em outras circunstâncias, porém, o sistema de aquecimento de água não provocou grandes influências para a classificação geral e, em poucos cenários, a alta eficiência do sistema de aquecimento de água diminuiu a eficiência da UH, quando avaliada por completo.

São Paulo (SP) - GCL 1a						Cuiabá (MT) - GCL 24					
Nº UH	Emis. CO2	CEP Real	CEP Ref	% Red. CEP	Classe	Emis. CO2	CEP Real	CEP Ref	% Red. CEP	Classe	
16	0.67	6337.02	6787.4	6.64	C	0.81	10429.8	10186	-2.4	D	Cobertura 4º pav.
15	0.68	6372.65	6782.1	6.04	C	0.81	10446.5	10220	-2.22	D	
14	0.66	6018.38	6585.7	8.61	C	0.78	9938.16	10128	1.87	C	
13	0.65	5995.53	6603.2	9.2	C	0.78	9925.14	10115	1.87	C	
12	0.66	6173.34	6869.9	10.14	C	0.81	10390	10913	4.79	C	Intermed. 3º pav.
11	0.66	6121.98	6782.6	9.74	C	0.8	10355.3	10786	3.99	C	
10	0.64	5790.17	6447.6	10.2	C	0.78	9843.79	10276	4.21	C	
9	0.65	5838.09	6526.8	10.55	C	0.78	9881.84	10397	4.95	C	
8	0.67	6253.24	6921.9	9.66	C	0.82	10553.2	11017	4.21	C	Intermed. 2º pav.
7	0.67	6202.6	6835.1	9.25	C	0.81	10522.7	10893	3.4	C	
6	0.65	5855.19	6487.8	9.75	C	0.78	9990	10368	3.65	C	
5	0.65	5902.73	6566.6	10.11	C	0.79	10024.1	10486	4.4	C	
4	0.6	4970.3	5817.8	14.57	C	0.69	8330.64	9191.1	9.36	C	Térreo 1º pav.
3	0.59	4941.62	5772.2	14.39	C	0.68	8196.32	8985.3	8.78	C	
2	0.59	4842.51	5631.1	14	C	0.66	7801.73	8528.9	8.53	C	
1	0.59	4863.23	5666.7	14.18	C	0.67	7924.67	8716.1	9.08	C	
Salvador (BA) - GCL 21						Manaus (AM) - GCL 18					
Nº UH	Emis. CO2	CEP Real	CEP Ref	% Red. CEP	Classe	Emis. CO2	CEP Real	CEP Ref	% Red. CEP	Classe	
16	0.8	10643	10026	-6.15	D	0.84	11797.8	11309	-4.32	D	Cobertura 4º pav
15	0.8	10672.2	10083	-5.85	D	0.84	11810.2	11377	-3.81	D	
14	0.77	10178.6	10077	-1	D	0.82	11320.4	11582	2.26	C	
13	0.77	10153.1	10046	-1.07	D	0.82	11309.6	11551	2.09	C	
12	0.75	9772.18	10276	4.9	C	0.8	11066.8	11721	5.58	C	Intermed. 3º pav
11	0.75	9744.5	10156	4.05	C	0.8	11037.1	11582	4.71	C	
10	0.72	9224.67	9599.8	3.91	C	0.77	10523.3	10909	3.54	C	
9	0.72	9255.78	9718.2	4.76	C	0.77	10556.1	11075	4.69	C	
8	0.76	9927.86	10372	4.29	C	0.81	11226.9	11829	5.09	C	Intermed. 2º pav.
7	0.76	9904.88	10257	3.43	C	0.81	11202	11698	4.24	C	
6	0.73	9366.78	9688.9	3.32	C	0.78	10669.3	11020	3.18	C	
5	0.73	9393.55	9802.8	4.17	C	0.78	10697.7	11178	4.3	C	
4	0.63	7724.86	8580.1	9.97	C	0.7	9331.92	10980	15.01	B	Térreo 1º pav.
3	0.63	7614.48	8396.6	9.32	C	0.7	9188	10702	14.15	B	
2	0.61	7222.98	7913.3	8.72	C	0.67	8757.54	10027	12.66	B	
1	0.61	7323.02	8082	9.39	C	0.68	8890.5	10327	13.91	B	

Tabela 14 – Emissão de gás carbônico, consumo de energia primária e redução do consumo de energia primária para as condições real e de referência, por UH.

Todas as UH do pavimento térreo da tipologia padrão aplicada no clima do estado de São Paulo diminuíram um nível na classe de eficiência energética da envoltória, do nível “B” para o nível “C”, quando unidas ao sistema de aquecimento de água. Todos os outros pavimentos se mostraram um nível mais eficientes na classificação final, avançando do nível “D” para o “C”. Em Cuiabá, todas as UH do pavimento térreo e da cobertura com fachada norte exposta mantiveram o nível de eficiência que fora obtido apenas para a envoltória, enquanto todas as UH do pavimento intermediário aumentaram do nível “D” para o “C”. Em Salvador, o sistema de aquecimento de água só influenciou significativamente os pavimentos intermediários, de modo que a classe de eficiência energética da envoltória aumentou do nível “D” para o “C”. Em Manaus, as habitações da fachada oeste do pavimento térreo aumentaram da classe “C” para a “B” e as UH com fachada sul exposta dos pavimentos intermediários aumentaram da classe “D” para a “C”, enquanto o restante das UH desse clima mantiveram a classe de eficiência energética do sistema da envoltória.

O Gráfico 6 resume a mudança de comportamento das habitações quando avaliado somente o sistema da envoltória e quando avaliados todos os sistemas em conjunto. O valor +1 nesse gráfico, indica que a UH progrediu um nível na classe de eficiência energética, do “D” para o “C”, por exemplo. O valor -1 indica que a UH regrediu um nível na classe de eficiência energética, do “B” para o “C”, por exemplo.

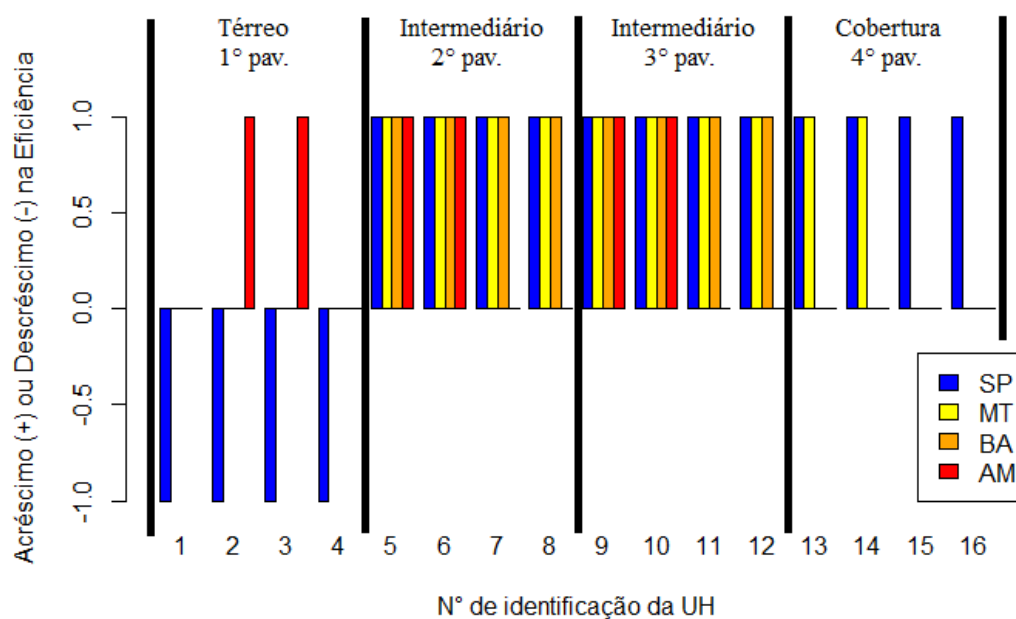


Gráfico 6 – Acréscimo ou decréscimo na classe de eficiência energética por UH.

Além dos dados necessários para a classificação de eficiência energética geral de cada UH estudada, a Tabela 14 descreve ainda a emissão de gás carbônico na fase de operação das habitações, a título de informação aos usuários. A medida que os consumos de energia primária crescem, as quantidades de gás carbônico emitidas também crescem.

4.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE SOBOL

A análise de sensibilidade total de Sobol identificou, dentre os parâmetros de entrada analisados, quais são aqueles que mais contribuem para a carga térmica de resfriamento, logo, os que mais contribuem para o consumo de energia primária da envoltória.

Como indicaram as observações relatadas nos resultados da aplicação do método simplificado da INI-R para os casos base, essa etapa foi dividida nos três grupos de exposições (cobertura, pavimentos intermediários e pavimento térreo).

4.2.1. Análise do pavimento de cobertura

O Gráfico 7 ilustra os valores da sensibilidade total, calculada pelo método de Sobol, para os 11 parâmetros de entrada analisados nas tipologias padrão do programa MCMV. Segundo os resultados apresentados nesse gráfico, para todos os climas brasileiros estudados, a absorvância da cobertura foi o fator mais influente na predição da carga térmica de resfriamento através do metamodelo da INI-R. Logo, para os casos base, alterar a absorvância da cobertura pode ser uma excelente alternativa para a economia de energia no caso analisado.

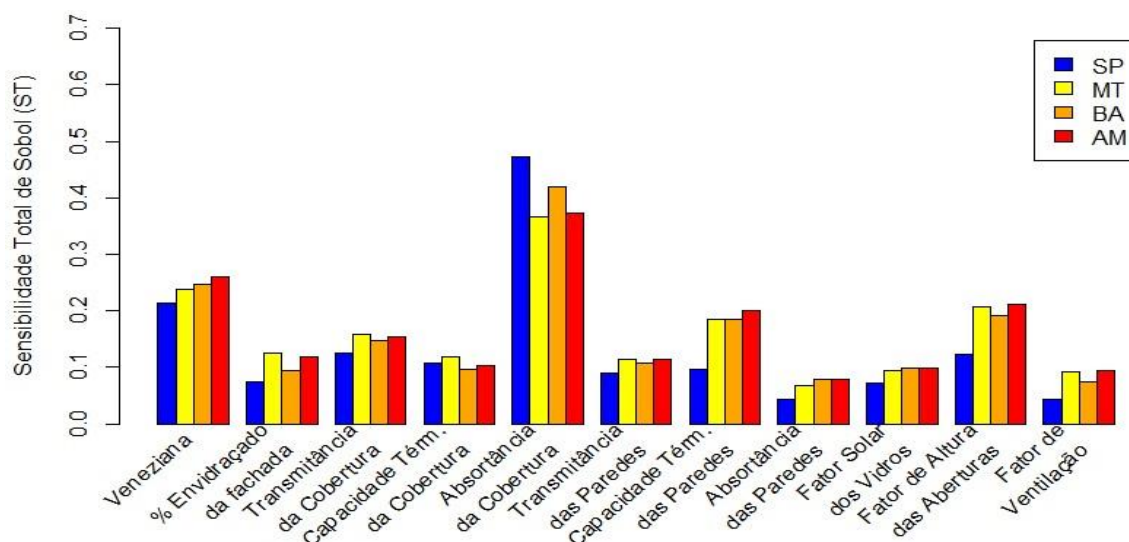


Gráfico 7 – Análise de sensibilidade total de Sobol dos pavimentos de cobertura.

Como cores mais claras são representadas por absortâncias menores e a absortância da cobertura está relacionada à coloração externa da cobertura do ambiente em estudo, entende-se que, para o pavimento de cobertura dos casos base, optar por coberturas com cores mais claras pode resultar em reduções consideráveis na carga térmica. Em climas quentes e úmidos onde, normalmente, utiliza-se a refrigeração artificial para proporcionar conforto térmico, cargas térmicas menores tendem a reduzir o consumo energético das UH.

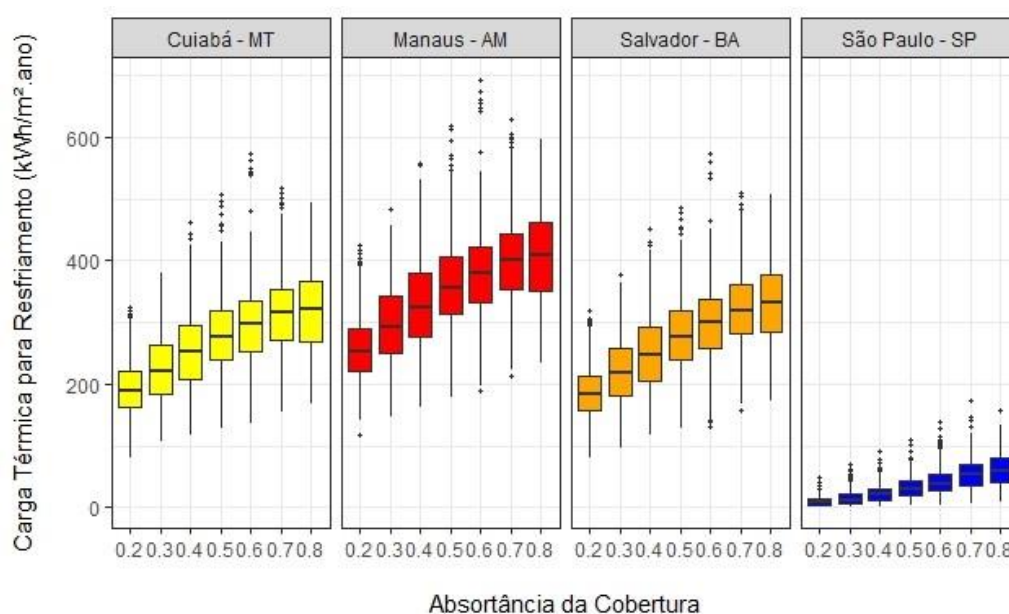


Gráfico 8 – Comportamento global da absortância da cobertura nos pavimentos de cobertura.

O Gráfico 8 é uma plotagem dos resultados da carga térmica de resfriamento dos casos base quando a absorvência da cobertura foi fixada em determinados valores, que variaram de 0,2 (limite mínimo) à 0,8 (limite máximo). Através desse gráfico foi possível afirmar que, com o aumento da absorvência da cobertura (cores mais escuras) houve também um aumento da carga térmica, para todos os climas analisados.

A Tabela 15 refere-se a estatística descritiva do Gráfico 8 para os casos onde a absorvência da cobertura encontrava-se nos limites mínimo (0,2) e máximo (0,8). Com os valores estatísticos foi possível calcular a diferença entre as médias da carga térmica de resfriamento para as diferentes absorvências em cada estado e encontrar um valor aproximado da economia de energia causada pela alteração da absorvência.

As maiores economias foram estimadas para os climas dos estados de Mato Grosso, Bahia e Amazonas, com reduções na carga térmica de resfriamento de 123,0 140,4 e 146,6 kWh/m²ano, respectivamente, enquanto o estado de São Paulo obteve uma economia energética estimada em 51,1 kWh/m²ano. Apesar do clima de São Paulo ter apresentado a menor economia absoluta, esse estado obteve a maior economia relativa, 83,6%, enquanto os climas de MT, BA e AM obtiveram 38,8, 42,8 e 36,2%, respectivamente. Os resultados estimaram que uma porção considerável de energia pode ser economizada através da alteração da absorvência da cobertura nos casos base, para os climas analisados.

	Limite da CgTR	Absorvência Cobertura	Carga térmica de resfriamento (kWh/m ² .ano)					
			Mínimo	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máximo
SP	Máx	0,8	8,3	41,6	60,4	61,1	79,9	156,3
	Mín	0,2	1,0	4,5	8,4	10,0	14,6	49,4
MT	Máx	0,8	166,6	269,4	321,9	317,2	365,1	493,6
	Mín	0,2	79,9	162,2	188,5	194,2	220,5	324,3
BA	Máx	0,8	173,7	284,2	331,0	328,1	376,4	507,9
	Mín	0,2	81,1	158,5	182,7	187,7	212,2	318,6
AM	Máx	0,8	234,7	350,4	407,6	405,3	461,9	596,8
	Mín	0,2	118,6	221,8	251,9	258,7	289	424

Tabela 15 – Estatística descritiva para a absorvência da cobertura nos pavimentos de cobertura.

De acordo com a análise de sensibilidade total (Gráfico 7), o uso ou não de veneziana foi o segundo fator mais influente na predição da carga térmica para a amostragem gerada. Para desenvolver o Gráfico 8, que ilustra o comportamento global

da veneziana, separou-se as UH geradas na amostragem para análise de sensibilidade de Sobol em duas condições: com veneziana (1) e sem veneziana (0). Para cada clima foram plotados os valores da carga térmica de resfriamento das UH de acordo com a condição da veneziana. Foi identificado que o uso de veneziana nos casos base resulta em economias energéticas.

De acordo com os resultados gerados para os pavimentos de cobertura do padrão construtivo do programa MCMV, o uso de veneziana é aconselhado em todos os climas analisados, já que é uma medida de eficiência energética simples e de fácil execução e que pode proporcionar economias energéticas consideráveis.

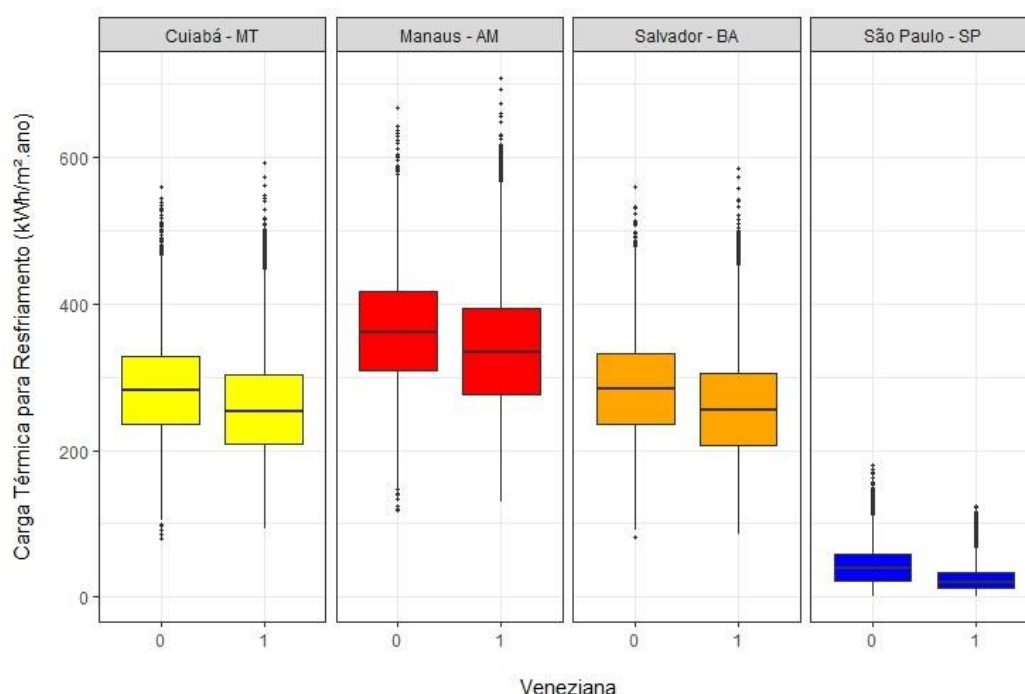


Gráfico 9 – Comportamento global do uso de venezianas nos pavimentos de cobertura.

Similar à estimativa de energia realizada para a absorção da cobertura, novamente, a Tabela 16 representa a descrição estatística dos dados encontrados no Gráfico 9, a fim de apresentar valores estimados da carga térmica de resfriamento para variações no uso da veneziana. Ao trabalhar com as médias das cargas térmicas, foi possível estimar que a aplicação de venezianas pode gerar economias de 17,6 a 24 kWh/m²K. Foi identificado que os valores absolutos das economias geradas pelo uso de veneziana foram muito próximos para todos os estados, de forma que o clima de São

Paulo, por apresentar as menores cargas térmicas absolutas, apresentou a maior economia relativa, 41,3%.

	Limite da CgTR	Veneziana	Carga térmica de resfriamento (kWh/m ² .ano)					
			Mínimo	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máximo
SP	Máx	Sem	1,0	22,5	38,5	42,6	58,8	179,4
	Mín	Com	1,0	11,4	206,0	25,0	34,2	124,3
MT	Máx	Sem	19,9	236,1	281,6	282,6	327,8	559,8
	Mín	Com	93,9	208,1	253,5	259,0	303,8	591,7
BA	Máx	Sem	80,9	235,9	284,1	284,2	333,0	560,3
	Mín	Com	84,7	206,4	255,2	260,2	305,6	585,2
AM	Máx	Sem	118,6	309,0	361,4	362,1	416,1	668,1
	Mín	Com	129,5	277,1	333,8	339,0	393,2	708,4

Tabela 16 – Estatística descritiva para o uso de veneziana nos pavimentos de cobertura.

Dentre os outros parâmetros de entrada analisados para os casos base, o fator de altura da abertura e a capacidade térmica das paredes externas foram aqueles que apresentaram valores intermediários de sensibilidade em relação à carga térmica. No clima de São Paulo essas variáveis não foram muito relevantes, porém, ganharam mais importância nos climas mais quentes e úmidos estudados (MT, BA e AM).

A absorvância das paredes externas, o fator de ventilação e o fator solar dos vidros foram os parâmetros menos expressivos para a predição da carga térmica de resfriamento da tipologia em estudo através do metamodelo da INI-R. O Gráfico 10 diz respeito à plotagem da carga térmica de resfriamento quando valores discretos da absorvância das paredes externas foram fixados e todos os outros parâmetros de entrada foram variados.

Assim, como para os parâmetros de entrada mais importantes para o cálculo da carga térmica de resfriamento dos casos base através da INI-R, a Tabela 17 se refere à estatística descritiva da absorvância das paredes externas. Essa tabela foi elaborada a fim de estimar as economias médias provenientes da alteração dos valores desse parâmetro de entrada. As economias de energia para os climas de SP, MT, BA e AM foram 19,7 (46%), 58,7 (20,2%), 66,8 (22,5%) e 72 kWh/m².ano (19,3%), respectivamente.

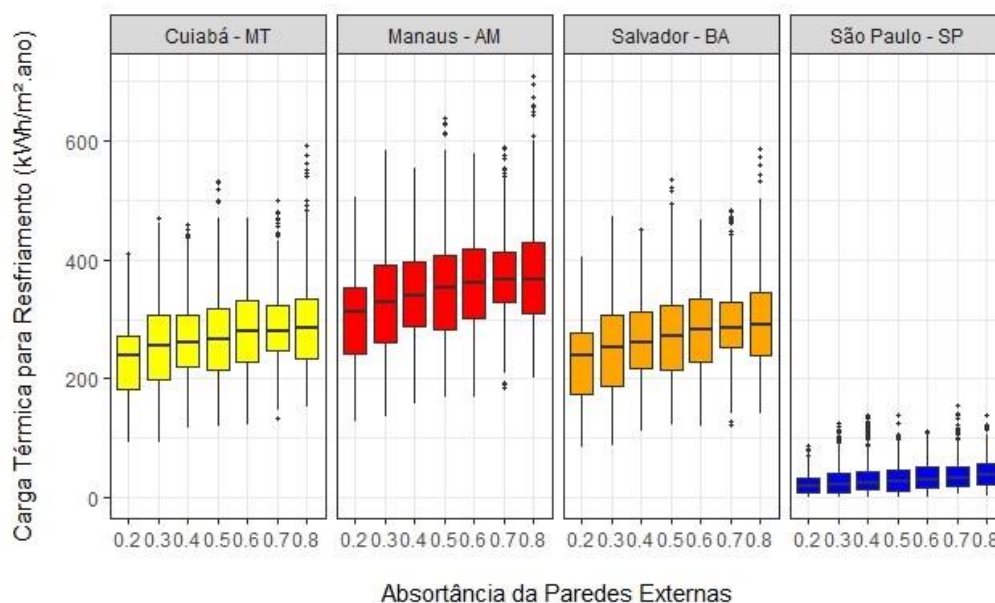


Gráfico 10 – Comportamento global da absorvância das paredes externas nos pavimentos de cobertura.

No estudo da sensibilidade dos parâmetros de entrada desse pavimento identificou-se que, nos climas mais quentes e úmidos, como os climas de Cuiabá, Salvador e Manaus, o comportamento dos parâmetros de entrada para os casos base sobre a carga térmica de resfriamento é similar. Em especial, os climas de Cuiabá e de Manaus foram aqueles que mais se assemelharam, com valores muito próximos para as cargas térmicas de resfriamento da envoltória, para o consumo de energia primária e para a importância dos parâmetros de entrada, avaliados através da sensibilidade total de Sobol.

	Limite da CgTR	Absorvância das paredes	Carga térmica de resfriamento (kWh/m².ano)					
			Mínimo	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máximo
SP	Máx	0,8	3,5	21,6	39,4	42,8	57,5	139,14
	Mín	0,2	1,0	8,3	20,7	23,1	33,4	87,2
MT	Máx	0,8	152,6	234,3	284,1	290,2	333,3	591,7
	Mín	0,2	94,4	182,0	239,2	231,5	271,0	409,4
BA	Máx	0,8	142,7	238,0	291,9	296,4	345,5	585,2
	Mín	0,2	85,8	175,4	240,0	229,6	277,3	403,0
AM	Máx	0,8	202,7	309,0	366,7	373,6	427,3	708,4
	Mín	0,2	129,6	242,2	312,8	301,6	353,8	504,3

Tabela 17 – Estatística descritiva para a absorvância das paredes externas nos pavimentos de cobertura.

Para reduzir o consumo dos pavimentos de cobertura da tipologia padrão do MCMV nos climas em análise, através do método simplificado do regulamento, os resultados apontaram que se deve atentar, especialmente, à absorvância da cobertura e ao uso de venezianas, já que apresentaram maiores influências na predição da carga térmica.

4.2.2. Análise dos pavimentos intermediários

Nos pavimentos intermediários um número menor de parâmetros de entrada foi analisado, já que, no método simplificado da INI-R, a absorvância, a capacidade térmica e a transmitância da cobertura não influenciam na predição da carga térmica das UH dos pavimentos sem exposição da cobertura.

De acordo com a análise de sensibilidade total de Sobol, exposta no Gráfico 11, dentre todos os parâmetros de entrada para a predição da carga térmica de resfriamento dos pavimentos intermediários da tipologia padrão em estudo, o uso ou não de veneziana apresentou-se como o parâmetro de entrada mais relevante. No clima de São Paulo, mais frio e seco, esse parâmetro assumiu participação ainda maior nos resultados.

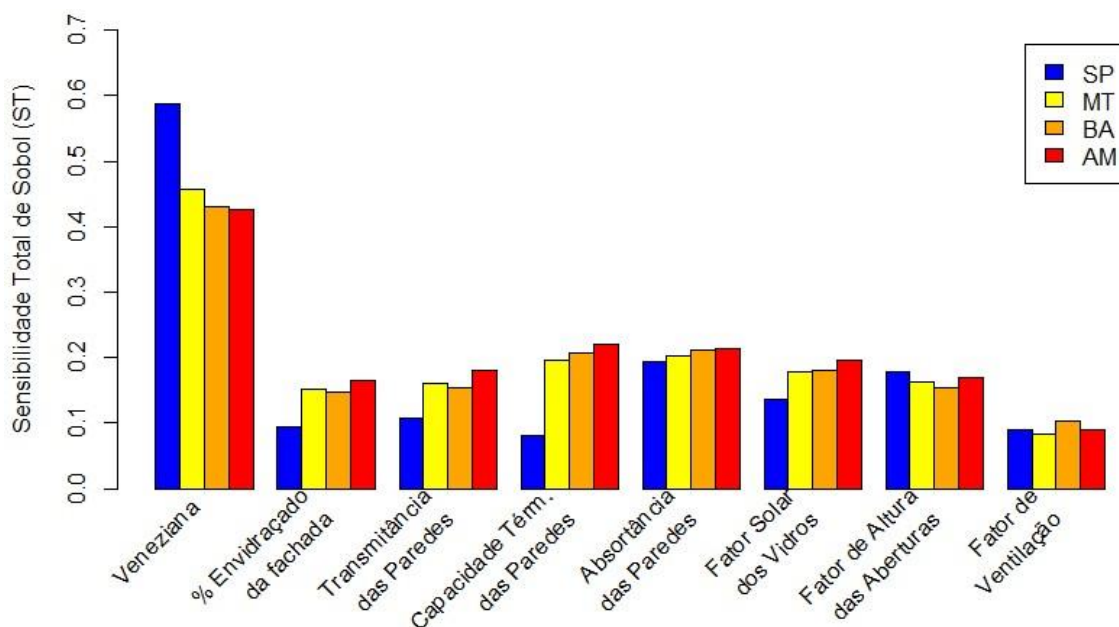


Gráfico 11 – Análise de sensibilidade total de Sobol dos pavimentos intermediários.

Através da plotagem do Gráfico 11 foi possível perceber que existe uma correlação entre o uso da veneziana e os outros parâmetros de entrada analisados. Notou-se que, para os climas onde a sensibilidade total relacionada ao uso da veneziana foi mais

importante, quando comparado aos outros climas, os outros parâmetros de entrada obtiveram menor importância. Ao comparar o clima de São Paulo com os outros, essa correlação ficou evidente, pois, enquanto o clima de SP apresentou maior sensibilidade à veneziana, os outros climas apresentaram sensibilidades maiores aos outros parâmetros, como o percentual envidraçado das fachadas, o fator solar dos vidros e a capacidade e a transmitância térmica das paredes externas.

Analizados os dados da sensibilidade total dos parâmetros de entrada para os pavimentos intermediários, através do Gráfico 11, identificou-se que a veneziana foi o fator com maior importância para a predição da carga térmica através da INI-R. Portanto, optou-se por analisar o comportamento dessa variável através do Gráfico 12, fixando as condições de uso (1) ou não (0) da veneziana e plotando as cargas térmicas de resfriamento, a fim de encontrar estimativas para possíveis economias de energia.

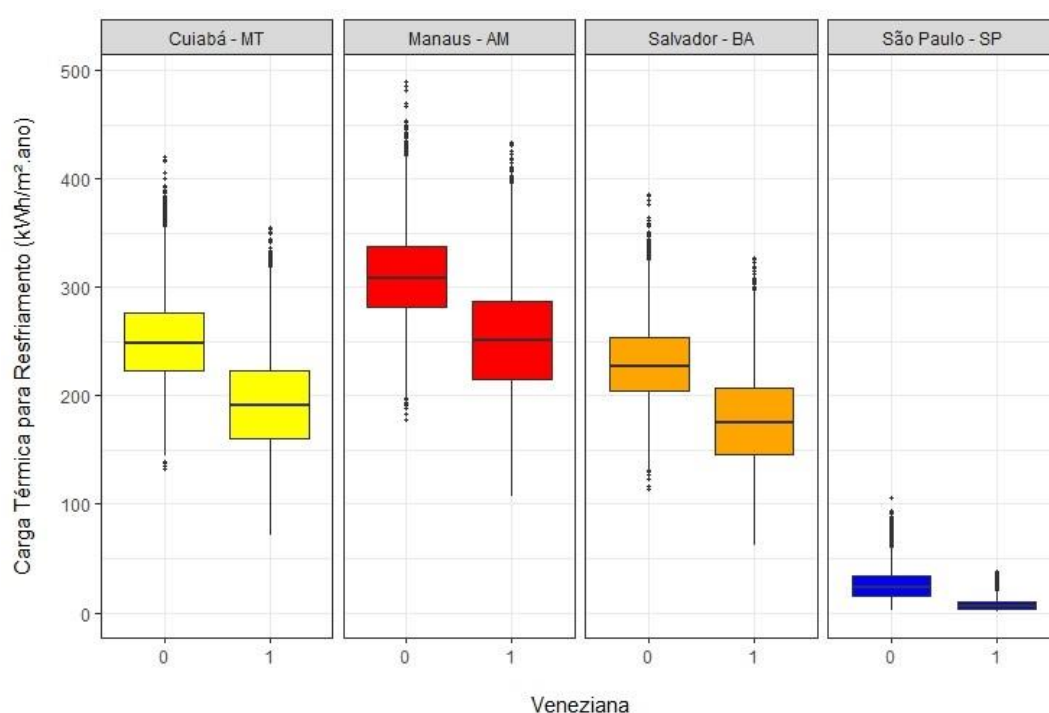


Gráfico 12 – Comportamento global do uso de venezianas nos pavimentos intermediários.

O Gráfico 12 demonstra que, assim como para os pavimentos de cobertura, o uso da veneziana nos casos base é uma alternativa que reduz a carga térmica de resfriamento, quando calculada pelo método simplificado da INI-R. De acordo com a Tabela 18, que representa a estatística descritiva desse parâmetro de entrada, foi possível estimar, através

das diferenças entre as médias das cargas térmicas, que o uso de veneziana é capaz de proporcionar reduções de 52,2 (22,7%), 57,6 (18,6%) e 58,2 kWh/m²ano (23,2%) na carga térmica de resfriamento para os climas dos estados da Bahia, Manaus e Mato Grosso, respectivamente. As UH com veneziana do clima de São Paulo apresentaram médias da carga térmica de resfriamento 18,8 kWh/m²ano menor do que as UH sem veneziana, sendo que o valor representa uma redução energética relativa de 72,4%.

Os valores de redução de carga térmica encontrados para os climas dos estados de MT, BA e AM foram muito próximos. Essa constatação reafirmou o que foi exposto no Gráfico 11, indicando que a variável relacionada ao uso de venezianas obteve importâncias muito próximas na predição da carga térmica desses climas. Os resultados levam a crer que medidas de eficiência energética similares podem ser aplicadas aos pavimentos intermediários, quando inseridos nesses climas.

			Carga térmica de resfriamento (kWh/m ² .ano)					
	Limite da CgTR	Veneziana	Mínimo	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máximo
SP	Máx	Sem	2,5	15,3	22,9	26,0	33,5	105,8
	Mín	Com	1,0	2,7	5,5	7,2	10,0	38,4
MT	Máx	Sem	132,4	223,7	248,0	251,1	276,5	420,9
	Mín	Com	70,7	160,0	191,3	192,9	223,1	355,6
BA	Máx	Sem	114,2	204,4	227,2	229,7	253,1	385,1
	Mín	Com	61,9	146,4	175,8	177,5	206,7	327,4
AM	Máx	Sem	177,6	281,8	307,7	310,1	337,5	489,7
	Mín	Com	107,6	214,9	251,4	252,5	287,2	433,2

Tabela 18 – Estatística descritiva para o uso de veneziana nos pavimentos intermediários.

A absorvância das paredes externas, o fator de altura das aberturas e o fator solar dos vidros assumiram as próximas colocações na escala de sensibilidade total para esses pavimentos. Os outros parâmetros de entrada se apresentaram ainda menos relevantes para a predição da carga térmica, de forma que a variação desses parâmetros gerou contribuições pouco relevantes no parâmetro de saída.

De acordo com o Gráfico 11, o fator de ventilação dos pavimentos intermediários do padrão do MCMV estudado, foi o parâmetro que apresentou menor sensibilidade total para a predição da carga térmica, exceto para o clima do estado de São Paulo, onde a capacidade térmica das paredes externas representou o parâmetro de menor sensibilidade. Portanto, foi decidido traçar o Gráfico 13. Esse gráfico, novamente, fixou valores

discretos para fator de ventilação e plotou as cargas térmicas de resfriamento para cada um dos valores, enquanto os outros parâmetros de entrada variaram.

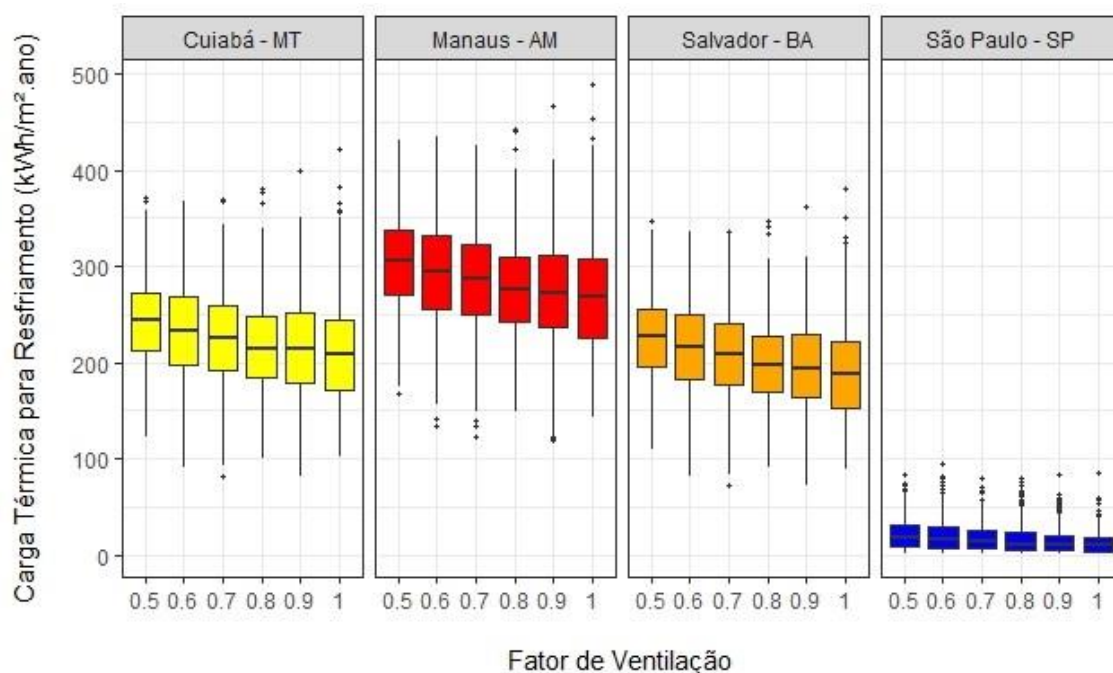


Gráfico 13 – Comportamento global fator de ventilação nos pavimentos intermediários.

Para auxiliar a estimar o potencial de economia energética através da variação do fator de ventilação, foi realizada a estatística descritiva desse parâmetro, como consta na Tabela 19. Dentre os climas analisados, os climas de Cuiabá, Salvador e Manaus, mais quentes e úmidos, obtiveram estimativas de economia energética de 32 (13,2%), 35,4 (15,8%) e 33 kWh/m²ano (11,0%), respectivamente. Já o clima de São Paulo, mais frio e seco, obteve 9,8 kWh/m²ano (43,6%).

	Limite da CgTR	Fator de ventilação	Carga térmica de resfriamento (kWh/m ² .ano)					
			Mínimo	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máximo
SP	Máx	0,5	1,0	8,7	18,8	22,5	31,6	83,4
	Mín	1,0	1,0	3,5	9,8	12,7	18,1	86,0
MT	Máx	0,5	122,0	212,0	244,8	241,8	272,7	370,3
	Mín	1,0	102,3	171,8	208,0	209,8	243,3	420,9
BA	Máx	0,5	110,2	194,9	227,5	224,7	254,7	347,4
	Mín	1,0	88,3	152,5	188,5	189,3	221,3	380,9
AM	Máx	0,5	167,9	269,8	305,7	301,3	336,8	431,4
	Mín	1,0	143,8	225,6	267,5	268,3	307,0	489,7

Tabela 19 – Estatística descritiva para o fator de ventilação nos pavimentos intermediários.

4.2.3. Análise do pavimento térreo

Pelos mesmos motivos relatados no início do item 4.2.2 desse texto, no pavimento térreo também foram excluídos da análise de sensibilidade global a absortância e a capacidade e a transmitância térmica da cobertura.

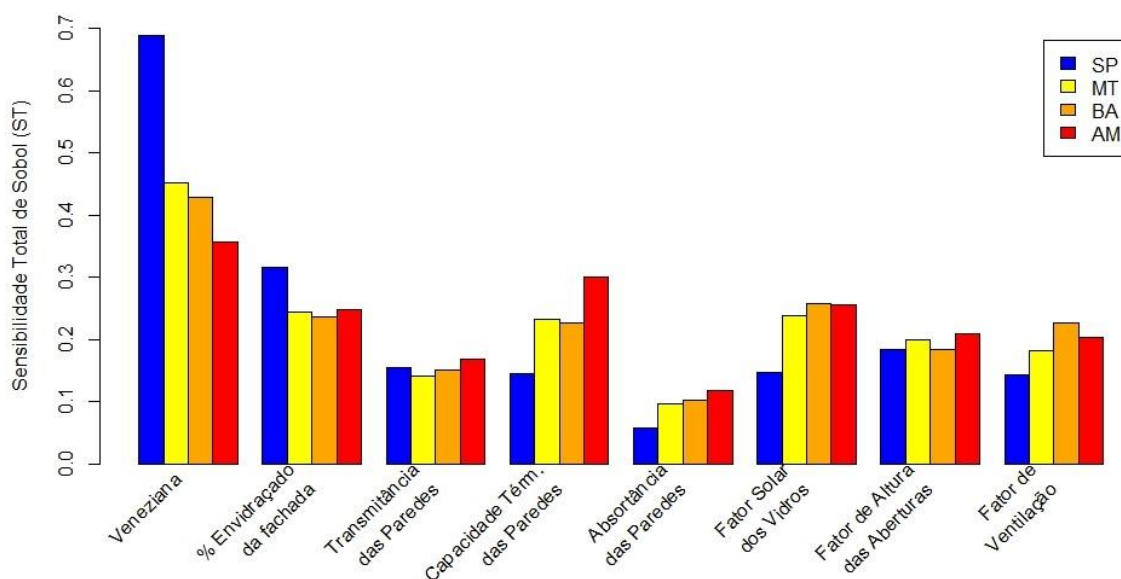


Gráfico 14 – Análise de sensibilidade total de Sobol dos pavimentos térreos.

Nos pavimentos térreos, devido à exposição do piso ao solo, cada cidade analisada apresentou valores bem particulares de sensibilidade total para cada um dos parâmetros de entrada. Essa observação indicou que, nos pavimentos térreos dos casos base, os fatores climáticos têm alta influência na predição da carga térmica através do metamodelo do método simplificado da INI-R.

Assim como nos outros pavimentos, o uso ou não de veneziana demonstrou-se como o parâmetro de entrada mais influente na predição da carga térmica de resfriamento através do método simplificado da INI-R, sendo que o clima da cidade de São Paulo apresentou-se ainda mais sensível que os outros climas a esse parâmetro. Com o intuito de analisar de forma detalhada o comportamento dessa variável, plotou-se o Gráfico 15, que, ao fixar o uso (1) ou não (0) de veneziana e variar todos os outros parâmetros, expôs as cargas térmicas de resfriamento através de um gráfico de caixas.

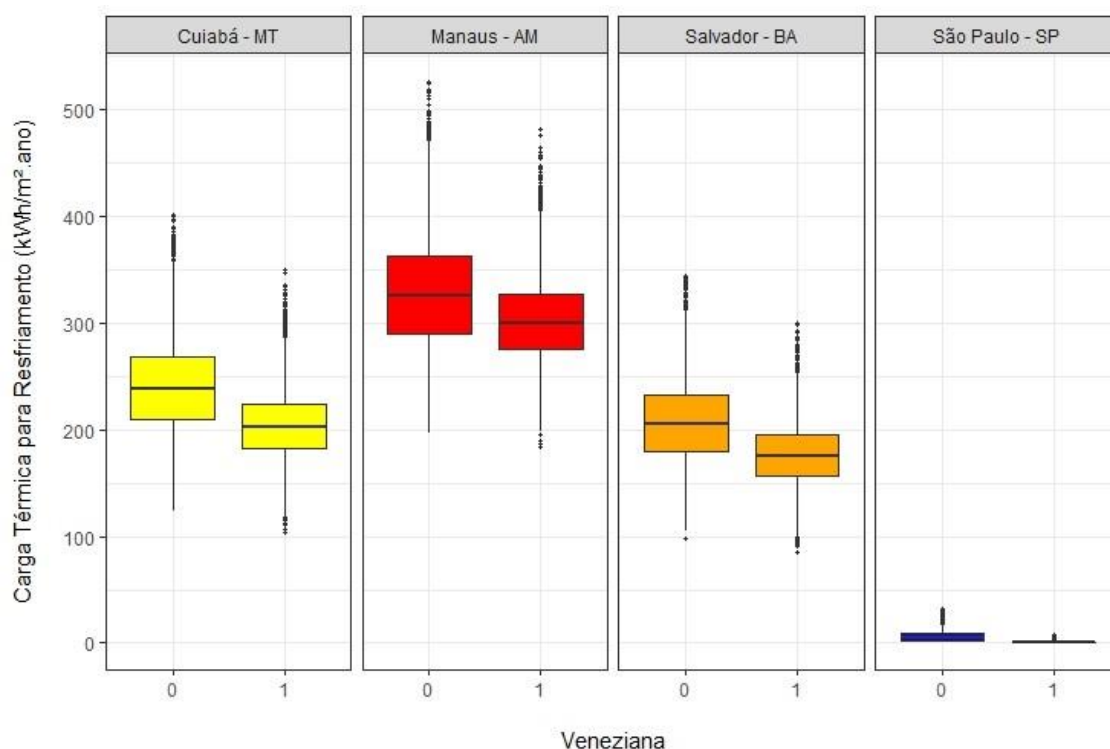


Gráfico 15 – Comportamento global do uso de venezianas nos pavimentos térreos.

O Gráfico 15 ilustra que a aplicação de venezianas nos pavimentos térreos das edificações do estudo de caso gerou reduções de carga térmica, entretanto, o clima do estado de São Paulo, por apresentar valores de cargas térmicas inferiores nesses pavimentos, dificultou a identificação do potencial de economia de energia. Assim, de forma a esclarecer os potenciais de economia de energia de cada clima analisado e apresentar as descrições estatísticas do Gráfico 15, foi elaborada a Tabela 20.

	Limite da CgTR	Veneziana	Carga térmica de resfriamento (kWh/m ² .ano)					
			Mínimo	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máximo
SP	Máx	Sem	1,0	2,4	4,8	6,2	8,7	32,7
	Mín	Com	1,0	1,0	1,0	1,3	1,4	8,1
MT	Máx	Sem	123,0	209,1	237,8	240,5	268,8	401,8
	Mín	Com	103,8	181,9	202,0	204,4	224,0	349,7
BA	Máx	Sem	98,5	179,1	204,7	207,0	232,2	343,9
	Mín	Com	85,3	156,7	175,7	177,1	195,4	300,1
AM	Máx	Sem	196,1	289,8	324,6	328,0	362,5	525,8
	Mín	Com	184,1	274,6	300,1	302,6	327,1	480,9

Tabela 20 – Estatística descritiva para o uso de veneziana nos pavimentos térreos.

Segundo a Tabela 20, os climas de Mato Grosso, Bahia e Amazonas apresentaram reduções na carga térmica de resfriamento de 35,8 (14,9%), 29,9 (14,4%) e 25,4 kWh/m²ano (7,7%), respectivamente, enquanto o clima do estado de São Paulo apresentou uma redução absoluta na carga térmica de 4,9 kWh/m²ano. Apesar de o clima de São Paulo ter oferecido reduções absolutas muito menores, apresentou uma redução relativa de 79,0%, pois esse clima obteve cargas térmicas baixíssimas.

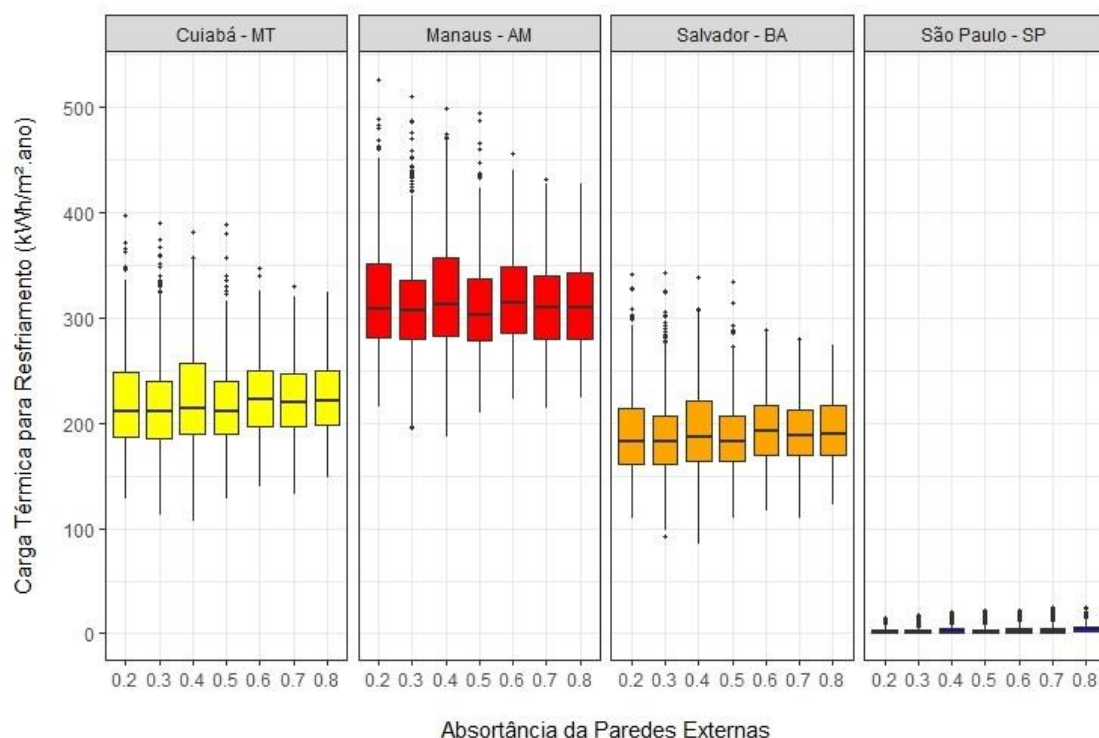


Gráfico 16 – Comportamento global da absorvência das paredes externas nos pavimentos térreos.

A transmitância e a capacidade térmica das paredes externas e o fator de altura de abertura obtiveram pouca influência sobre a carga térmica de resfriamento para os pavimentos térreos do padrão MCMV em análise. Semelhante ao comportamento dos parâmetros de entrada para a predição da carga térmica da cobertura, a absorvância das paredes externas foi o fator de menor importância na perturbação da carga térmica desses pavimentos, perdendo sensibilidade quando comparada aos pavimentos intermediários. Já o fator solar dos vidros e o fator de ventilação apresentaram comportamento similar às habitações dos pavimentos intermediários, ganhando importância em relação a cobertura.

A fim de detalhar o comportamento dos parâmetros mais e menos influentes na predição da carga térmica de resfriamento, foi plotado o Gráfico 16, que se trata da exposição da carga térmica para todos os casos onde foram fixados valores discretos da absorvância das paredes externas do pavimento térreo, enquanto todos os outros parâmetros de entrada variaram.

Os climas mais quentes e úmidos apresentaram comportamentos próximos, especialmente Cuiabá e Salvador, onde o parâmetro de saída manifestou maior sensibilidade à veneziana e sensibilidades baixas para a absorvância e transmitância das paredes externas.

	Limite da CgTR	Absorvância das paredes	Carga térmica de resfriamento (kWh/m ² .ano)					
			Mínimo	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máximo
SP	Máx	0,8	1,0	1,4	2,6	4,7	6,6	24,8
	Mín	0,3	1,0	1,0	1,2	2,8	3,2	18,6
MT	Máx	0,6	140,0	197,2	222,7	224,9	249,7	346,7
	Mín	0,3	112,4	184,9	211,3	216,5	239,5	389,8
BA	Máx	0,6	116,1	170,0	192,4	194,2	216,9	287,9
	Mín	0,3	92,9	161,4	182,9	187,2	206,3	342,3
AM	Máx	0,4	186,9	281,9	313,0	320,2	356,4	499,0
	Mín	0,5	210,2	278,1	301,9	308,9	336,6	494,0

Tabela 21 – Estatística descritiva para a absorvância das paredes externas nos pavimentos térreos.

Como apoio às informações expostas pelo Gráfico 16, a Tabela 21 se encarregou de expor a descrição estatística dos valores mais críticos plotados (aqueles que apresentaram as médias mínimas e máximas da carga térmica). Através dessa tabela foi possível estimar a economia de energia média proveniente da alteração do valor da absorvância das paredes externas, de modo a esclarecer a baixa importância que essa

variável representa quando comparada aos outros parâmetros. De acordo com a referida tabela, os climas dos estados de São Paulo, Mato Grosso, Bahia e Amazonas apresentaram estimativas de economias energéticas máximas de 1,9 (40,4%), 8,4 (3,7%), 7 (3,6%) e 11,3 kWh/m²ano (3,5%), respectivamente.

Para o pavimento térreo, dentre os climas quentes e úmidos analisados, Manaus destacou-se em relação ao comportamento dos parâmetros de entrada. Diferente de todos os outros climas, a sensibilidade total do uso de veneziana para o caso base aplicado a esse clima foi, relativamente, baixa. Como constatado anteriormente, com a redução da sensibilidade do uso de venezianas, os outros parâmetros de entrada ganharam valor na escala de sensibilidade e se mostraram mais capazes de gerar perturbações no parâmetro de saída, de modo que esse foi o único caso em que a sensibilidade do uso de venezianas se aproximou da sensibilidade da capacidade térmica das paredes externa.

5. CONCLUSÃO

Esse trabalho de conclusão de curso tratou de analisar o nível de eficiência energética da tipologia H multifamiliar do Nível de renda 1 (até R\$1.600,00) do programa “Minha Casa Minha Vida”, baseado na nova proposta para o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, a Instrução Normativa Residencial do INMETRO (INI-R). Essa avaliação foi realizada para as cidades de São Paulo, Cuiabá, Salvador e Manaus, que representaram as quatro regiões (Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e Norte, respectivamente) onde foram encontrados registros de aplicação dessa tipologia, de acordo com levantamento realizado por Triana (2016).

O estudo se estendeu à análise de sensibilidade global dos parâmetros de entrada do metamodelo do método simplificado da INI-R para a predição da carga térmica de resfriamento, através da metodologia de Sobol. Dos 28 parâmetros de entrada utilizados no modelo preditivo, foram analisados 11 para os pavimentos de cobertura e 8 para os pavimentos intermediários e térreos. Através da amostragem desenvolvida para aplicar o método de Sobol, foram estimados os potenciais de economia energética a partir da variação dos parâmetros que apresentaram maiores e menores sensibilidades, levando em conta a variação simultânea de todos os outros parâmetros analisados.

O estudo reconheceu que, para os casos base, no clima da cidade de São Paulo, as cargas térmicas de resfriamento foram na ordem de 7,7 a 76,9 vezes maior do que as cargas térmicas de aquecimento. Já para os climas das cidades de Cuiabá, Salvador e Manaus, as cargas térmicas de resfriamento superaram as cargas térmicas de aquecimento em até 200 vezes. Foi reconhecido também que a magnitude das cargas térmicas e o comportamento do desempenho energético, para todos os climas analisados, foram influenciados pelas condições de exposição do piso e da cobertura. Ou seja, os pavimentos térreos, intermediários e coberturas, apresentaram tendências diferentes na redução das cargas térmicas das UH, assim como cargas térmicas de resfriamento em faixas de valores diferentes.

Foram aplicadas as seções do método simplificado da INI-R que se referem à envoltória e ao aquecimento de água. Todas as UH da tipologia em análise possuem o sistema de aquecimento de água a gás individual, com rendimento de 84%, portanto, receberam nível de eficiência energética “A” para o sistema de aquecimento de água.

Notou-se uma tendência crescente, dos pavimentos inferiores para os superiores, nas cargas térmicas das envoltórias dos casos base, em todos os climas analisados, sendo que, em cada pavimento, as UH com fachada exposta ao norte atingiram cargas térmicas maiores. A classe de eficiência energética variou entre as classes “B” e “D”. Os pavimentos térreos atingiram classe “B” em 37,5% das UH (quatro UH em São Paulo e duas em Manaus) e “C” nas outras 62,5%, enquanto os pavimentos intermediários e as coberturas apresentaram classe “D” em 87,5% das UH, e “C” nas outras 12,5% (todas no clima de Manaus). Apesar do clima de Manaus ter alcançado classe de eficiência “C” nos pavimentos intermediários e na cobertura, as reduções de carga térmica se encontraram muito próximas do limite para a classe “D”, logo, mesmo atingindo uma classe mais eficiente, as UH não apresentaram eficiência energética expressivamente maior.

A classificação geral de eficiência energética une os dois sistemas de maior relevância para a avaliação de desempenho energético da INI-R: a envoltória e o aquecimento de água. Como todas as UH da tipologia em análise atingiram classe de eficiência energética “A” para o aquecimento de água, esperava-se que, ao realizar a união com o consumo da envoltória, todas as habitações atingissem classe de eficiência energética maior ou igual à classe obtida pela envoltória isoladamente.

Utilizando como base comparativa a classe de eficiência energética da envoltória dos casos base, identificou-se que 100% das UH dos pavimentos intermediários, em todos os climas estudados, avançaram da classe “D” para a classe “C”. As UH das coberturas dos climas de Salvador e Manaus mantiveram a classificação da envoltória, enquanto 100% das UH de São Paulo e 50% das UH de Cuiabá elevaram a classe de eficiência de “D” para “C”. O pavimento térreo dos casos base no clima de SP foi o único que obteve resultados inconsistentes, pois ao unir a envoltória, de classe “B”, com o aquecimento de água, de classe “A”, obteve-se a classificação geral de eficiência energética de classe “C”, desmerecendo os esforços obtidos nos dois sistemas de maior relevância. Ainda nos pavimentos térreos, metade das UH de Manaus elevaram da classe “C” para a classe “B” e o restante dos casos manteve a classe de eficiência energética “C”.

A etapa da análise de sensibilidade total de Sobol identificou que, para os pavimentos de cobertura dos casos base, a absorvância da cobertura foi o parâmetro de entrada mais sensível à predição das cargas térmicas de resfriamento, em todos os climas. Os potenciais de economia foram estimados entre 51,1 kWh/m²ano, que representou 83,6% de economia relativa para o clima de São Paulo, e 146,6 kWh/m²ano, que

representa 36,2% de economia relativa para o clima de Manaus. Para todos os climas, o segundo parâmetro de entrada mais influente para os pavimentos de cobertura e também o parâmetro de entrada mais influente para todos os outros pavimentos foi o uso ou não de veneziana, que, no clima de São Paulo, pode gerar economias relativas de até 41,3% no pavimento de cobertura, 72,4% nos pavimentos intermediários e até 79% no pavimento térreo.

A partir da análise de sensibilidade total notou-se que os pavimentos de cobertura dos casos base, por apresentarem maior quantidade de parâmetros de entrada para o cálculo da carga térmica de resfriamento através do metamodelo do método simplificado da INI-R, tenderam a apresentar maior quantidade de alternativas com alto potencial de economia energética. A importância dos parâmetros de entrada para os pavimentos térreos demonstrou alta variação de acordo com o clima, observação que pode ser relacionada à exposição do solo, que evidenciou as particularidades de cada clima.

Sintetizando os comportamentos da tipologia padrão de baixa renda do MCMV, relacionados à importância dos parâmetros de entrada para a predição das cargas térmicas de resfriamento e às próprias cargas térmicas de resfriamento, identificou-se que, dentre os climas analisados, os climas mais quentes e úmidos (Cuiabá, Salvador e Manaus) apresentaram comportamentos muito próximos. Ou seja, os resultados das magnitudes das cargas térmicas de resfriamento, das tendências de reduções das cargas térmicas da envoltória e dos consumos de energia primária total das UH e da importância dos parâmetros de entrada para a predição das cargas térmicas de resfriamento, foram muito próximos. Já o clima mais frio e seco (São Paulo), apresentou resultados diferentes, indicando outro tipo de comportamento para esse clima. As observações realizadas indicaram que, para análise de eficiência energética dos casos base através do método simplificado da INI-R, o clima pode ser considerado como um dos fatores mais relevantes.

5.1. LIMITAÇÕES

As limitações encontradas no desenvolvimento desse trabalho foram:

- Os resultados são válidos somente para a tipologia padrão do Nível de renda 1 do MCMV para os climas analisados;

- O metamodelo foi utilizado extrapolando os limites estabelecidos no método simplificado da INI-R;
- As estimativas dos potenciais de economia energética utilizaram a diferença entre as médias das cargas térmicas das UH quando determinado parâmetro de saída foi fixado, de modo que podem ocultar detalhes do comportamento dos fenômenos estudados.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para estudos em trabalhos futuros são:

- Simular os casos base e comparar os resultados das cargas térmicas simuladas com os resultados encontrados na extrapolação do metamodelo;
- Identificar se a variação no comportamento da carga térmica entre os pavimentos com diferentes exposições de piso e cobertura se repete em outras tipologias e climas;
- Estudar a inconsistência encontrada na classificação de eficiência energética (método simplificado da INI-R) geral das UH do pavimento térreo de São Paulo;
- Realizar alterações no sistema de aquecimento de água e identificar os potenciais de economia energética gerados, já que esse sistema representa parte importante do consumo de energia das edificações nos climas estudados;
- Aplicar a INI-R para as tipologias do programa MCMV em outros climas brasileiros e sugerir alterações nos parâmetros de entrada que visem o conforto térmico e a economia de energia;
- Realizar um estudo financeiro para relacionar os valores da estimativa de economia energética com o tempo de retorno financeiro da aplicação das respectivas medidas de eficiência energética.

REFERÊNCIAS

AMASYALI, Kadir; EL-GOHARY, Nora M. A review of data-driven building energy consumption prediction studies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1192-1205, 2018.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE. **ANSI/ASHRAE 90.1-2016: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. Atlanta, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15220: Desempenho Térmico de Edificações**. ABNT: Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15575: Edificações Habitacionais - Desempenho**. ABNT: Rio de Janeiro, 2013.

BAKAR, Nur Najihah Abu et al. Energy efficiency index as an indicator for measuring building energy performance: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 1-11, 2015.

COMISSÃO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (SUBCOMISSÃO RIO+20) – CMADS. Relatório Rio +20: 2013.

Decreto Legislativo DNN213, de 18 de julho de 1991. **Institui o Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET) e dá outras providências**. Brasília, DF.

Decreto Legislativo nº 144, de 20 de junho de 2002. **Aprova o texto do Protocolo de Quioto à Convenção – Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima**. Brasília, DF.

Decreto Legislativo nº 4059, de 19 de dezembro de 2001. **Regulamenta a Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências**. Brasília, DF.

Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. **Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências**. Brasília, DF.

Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000. **Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências.** Brasília, DF.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco Energético Nacional 2017: ano base 2016.** Rio de Janeiro: 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Demanda de Energia 2050: Nota Técnica DEA 13/15.** Rio de Janeiro: 2016.

Portaria Interministerial nº 1877, de 30 de dezembro de 1985. **Institui o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL).** Brasília, DF.

MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, DESENVOLVIMENTO E GESTÃO – MPDG. Plano Plurianual 2016-2019, **Relatório Anual de Avaliação: ano base 2016.**

BRONZATTI, Fabricio Luiz; IAROZINSKI NETO, Alfredo. Matrizes energéticas no Brasil: cenário 2010-2030. **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, v. 28, p. 13-16, 2008.

California Energy Commission – CEC. Greenhouse gas emissions reductions, 2017.

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – CB3E. **Atividades Gerais entre Núcleos.** Disponível em: <<http://cb3e.ufsc.br/etiquetagem/desenvolvimento/atividades-2012-2016/trabalho-1/pesquisas>>. Acesso em: 01 de maio de 2018. 2017.

EUROPEAN CLIMATE FOUNDATION – ECF. Roadmap 2050: a practical guide to a prosperous, low-carbon Europe, vol. I: technical and economic assessment. 2010.

FOSSATI, Michele et al. Building energy efficiency: An overview of the Brazilian residential labeling scheme. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 1216-1231, 2016.

FOSSATI, Michele; LAMBERTS, Roberto. Relatório técnico final de elaboração do texto RTQ-R. Florianópolis, SC, Brasil. 2011.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. Déficit Habitacional no Brasil, 2015.

GANHÃO, António Miguel Ganço Dias. **Construção Sustentável – Propostas de melhoria da eficiência energética em edifícios de habitação**. 2011. Tese de Doutorado. FCT-UNL.

HADJIPASCHALIS, Ioannis; POULLIKKAS, Andreas; EFTHIMIOU, Venizelos. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 13, n. 6-7, p. 1513-1522, 2009.

HADJIPASCHALIS, Ioannis; POULLIKKAS, Andreas; EFTHIMIOU, Venizelos. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 13, n. 6-7, p. 1513-1522, 2009.

HUANG, Jianen et al. Thermal properties optimization of envelope in energy-saving renovation of existing public buildings. **Energy and Buildings**, v. 75, p. 504-510, 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL – INMETRO. Portaria nº 18, de 16 de janeiro de 2012. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Residenciais**. INMETRO: Rio de Janeiro, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL – INMETRO. Portaria nº 372, de 17 de setembro de 2010. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. Brasília, DF.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL – INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Brasília, DF. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL – INMETRO. **Tabelas de Consumo/Eficiência Energética Aquecedores de Água a Gás Instantâneos**. 2017.

JANDA, Kathryn B. Buildings don't use energy: people do. **Architectural science review**, v. 54, n. 1, p. 15-22, 2011.

KRAUSE, CLEANDRO, BALBIM Renato and NETO Vicente Correia Lima. Minha Casa Minha Vida, nosso crescimento: Onde fica política habitacional?. No. 1853. **Texto para Discussão, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)**, 2013.

LOURA, Rejage Magiag; ASSIS, Eleonora Sad de; BASTOS, Leopoldo EG. Análise comparativa entre resultados de desempenho térmico de envoltórias de edifício residencial gerados por diferentes normas brasileiras. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC)**, v. 11, 2011.

MARA, Thierry A.; TARANTOLA, Stefano. Application of global sensitivity analysis of model output to building thermal simulations. **Building Simulation**. Tsinghua Press, p. 290-302, 2008.

MAZZAFERRO, Leonardo et al. Desenvolvimento do metamodelo para a etiquetagem de edificações residenciais. **XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, ENTAC**, 2018.

MONTES, María Andrea Triana et al. Abordagem integrada no ciclo de vida de habitação de interesse social considerando mudanças climáticas. 2016.

MONZONI, Mario; VENDRAMINI, Annelise. Edificações sustentáveis e eficiência energética. **Centro de Estudos em Sustentabilidade (GVces)**, 2017.

NEJAT, Payam et al. A global review of energy consumption, CO2 emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO2 emitting countries). **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 43, p. 843-862, 2015.

OJIMA, Ricardo. A produção e o consumo do espaço nas aglomerações urbanas brasileiras: desafios para uma urbanização sustentável. **Anais**, p. 1-19, 2016.

Organização das Nações Unidas – ONU. **Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento**, 1995.

PEREIRA, Cláudia Donald. A influência do envelope no desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ocupadas e ventiladas naturalmente. 2009.

Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – PNAD. Síntese de Indicadores, 2015.

POUEY, Juliana Al-Alam; BRANDALISE, Mariane Pinto; SILVA, A. C. S. B. Determinação da Eficiência Energética da Envoltória de Projeto Residencial Unifamiliar Comparando os Resultados a Partir da Aplicação dos Métodos Prescritivo e de Simulação do RTQ-R. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC)**, v. 14, 2012.

SALTELLI, Andrea et al. (Ed.). **Sensitivity analysis**. New York: Wiley, 2000.

SALTELLI, Andrea; TARANTOLA, Stefano; CAMPOLONGO, Francesca. Sensitivity analysis as an ingredient of modeling. **Statistical Science**, v. 15, n. 4, p. 377-395, 2000.

SECRETARIA DE LOGÍSTICA E TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO – SLTI; MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO – MPOG. Instrução Normativa nº 2, de 04 DE junho de 2014. **Dispõe sobre regras para a aquisição ou locação de máquinas e aparelhos consumidores de energia pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional, e uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nos projetos e respectivas edificações públicas federais novas ou que recebam *retrofit***. DF, Brasília.

SILVA, Arthur Santos et al. Desenvolvimento de um método para avaliação do desempenho térmico e energético de edificações aplicando análise de incertezas e sensibilidade. 2016.

SILVA, Arthur Santos; GHISI, Enedir. Análise comparativa dos resultados do desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial pelos métodos de simulação do RTQ-R e da NBR 15575-1. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 215-230, 2014.

SILVA, Arthur Santos; GHISI, Enedir. Análise de sensibilidade global dos parâmetros termofísicos de uma edificação residencial de acordo com o método de simulação do RTQ-R. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 135-148, 2013.

SOARES, Roberta Mulazzani Doleys; ADAMS, Bruna; ULLMANN, Vanessa. Desempenho térmico de habitação social: norma NBR 15.575. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 5, n. 2, p. 53-64, 2016.

SOBOL', Il'ya Meerovich. On sensitivity estimation for nonlinear mathematical models. **Matematicheskoe modelirovanie**, v. 2, n. 1, p. 112-118, 1990.

SOUSA, João. O paradigma da eficiência energética dos edifícios. **Climatização Edifícios e Energia**. n°84, Media Line. Algés, p. 24-25, 2012.

TAVARES, Sergio F.; LAMBERTS, Roberto. Consumo de energia para construção, operação e manutenção das edificações residenciais no Brasil. **VIII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído, ENCAC**, 2005.

The Economist Intelligence Unit of Global Buildings Performance Network – GBPN. Energy Efficiency and energy savings: A view from the building sector. **The Economist**, 2012.

THOMAZ, Rodrigo Alan. Demanda de energia elétrica no Brasil: 1995-2015. 2017.

TIAN, Wei. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 411-419, 2013.

UNITED NATIONS POPULATION DIVISION – UNPD; DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS. **Population Facts 2017/4**: The impact of population momentum on future population growth.

VAN DER KNAAP, A. N. Building performance simulation to support building energy regulation. **Eindhoven University of Technology**, 2011.

WANG, Zeyu; SRINIVASAN, Ravi S. A review of artificial intelligence based building energy use prediction: Contrasting the capabilities of single and ensemble prediction models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 796-808, 2017.

WEI, Yixuan et al. A review of data-driven approaches for prediction and classification of building energy consumption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1027-1047, 2018.

WILLIAMS, James H. et al. The technology path to deep greenhouse gas emissions cuts by 2050: the pivotal role of electricity. **Science**, v. 335, n. 6064, p. 53-59, 2012.

ZHAO, Hai-xiang; MAGOULÈS, Frédéric. A review on the prediction of building energy consumption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3586-3592, 2012.